INTEGRALE EFFECTENANALYSE
Programma Energiehoofdstructuur 2023

Ontwikkeling energiehoofdinfrastructuur 2030-2050

Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Hoofddocument

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 Effectenanalyse/PlanMER

Projectnaam
Programma Energiehoofdstructuur 2023

Versienummer
Definitief

Opdrachtgever
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Auteurs
Joeri Vendrik, Roel van Ooij, Martha Deen, Mariëlle de Sain

Vrijgave
Paul Janssen, 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

Inhoudsopgave

0 Samenvatting 1

1 Inleiding, doel en kader integrale effectenanalyse PEH 7

1.1 Aanleiding en nut & noodzaak voor PEH en IEA/planMER 7
1.2 Scope en afbakening PEH en IEA 7
1.3 Proces van totstandkoming van de IEA/planMER 8
1.4 Beleidscontext van het Programma Energiehoofdstructuur 11
1.5 Samenhang hoofdrapport en achterliggende bijlagen en leeswijzer 12
1.6 Belangrijkste begrippen/termen 14

2 Het toekomstige energiesysteem 15

2.1 Inleiding 15
2.2 Van scenario's naar robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes 16
2.3 Uitgangssituatie: huidige situatie en 2030 17
2.4 Beschrijving scenario's 2050 18
2.5 Benodigde energie-infrastructuur 2050 20
2.6 Robuuste ontwikkelingen 2050 21
2.7 Structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050 23
2.8 Verschillen- en gevoeligheidsanalyse 35

3 Beoordelingssystematiek 36

3.1 Inleiding 36
3.2 Systeemefficiëntie 36
3.3 Milieu & Ruimte 37
3.4 Welvaartsanalyse 44
3.5 Uitvoerbaarheid & Doelbereik 46

4 Resultaten beoordeling robuuste ontwikkelingen 48

4.1 Inleiding 48
4.2 Beoordeling Milieu & Ruimte 48

5 Resultaten beoordeling structuurkeuzes en overige ontwikkelingen 55

5.1 Inleiding 55
5.2 Beoordeling per structuurkeuze 55
5.3 Beoordeling per systeemontwikkeling 67
5.4 Conclusies structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 69
5.5 Resultaten Gevoeligheidsanalyse 70
5.6 Uitvoerbaarheid & Doelbereik 71

6 Conclusies en afwegingen 75

6.1 Inleiding: Ruimtebehoefte energiesysteem 75
6.2 Conclusies belangrijkste ontwikkelingen 78
6.3 Conclusies per gebied 89
6.4 Welke ontwikkelingen komen als eerste (2030-2040)? 92
6.5 Overwegingen voor PEH 93

7 Bronnen 97

0 Samenvatting

Dit is de samenvatting van de integrale effectenanalyse (IEA)[1] van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) 2023. Het PEH is een ruimtelijk plan[2] op hoofdlijnen dat gaat over de ontwikkeling van energie-infrastructuur van nationaal belang (hoofdstructuur) tussen 2030 en 2050 die nodig is voor een klimaatneutraal energiesysteem. Het doel van PEH is om tijdig ruimte te reserveren voor deze energie-infrastructuur.
In het PEH worden drie soorten uitspraken opgenomen: over (bestaande) reserveringen, ruimtelijke ontwikkelrichtingen en generiek beleid. Deze uitspraken gaan over de benodigde energiehoofdstructuur voor elektriciteit, (brand)stoffen (grondstoffen, waterstof, CO_2, methaan) en warmte (bovenregionale warmtenetten). PEH vormt het kader voor en wordt verder uitgewerkt in projecten voor de realisatie van de energiehoofdstructuur.

De volgende onderdelen zijn onder de energiehoofdstructuur geschaard en meegenomen in deze IEA:

- hoogspanningsverbindingen (bovengronds en ondergronds);
- buisleidingen (ondergronds);
- puntinfrastructuur (hoogspanningsstations, regelbare centrales, elektrolysers, importterminals waterstof, opslag waterstof en batterijen).

Het doel en de noodzaak voor het PEH komt voort uit:

1. De energie-infrastructuur is één van de kritische succesfactoren voor het tijdig halen van klimaatdoelstellingen (tijdig voldoende ruimte nodig).
2. De ruimtedruk in Nederland is groot (integrale afweging met andere opgaven en belangen).
3. Het energiesysteem wordt steeds meer een geïntegreerd systeem (samenhang onderdelen).

Dit PEH is de eerste in zijn soort, kent een horizon van 2050 en vindt plaats in een continu veranderende (energie)wereld. Dit maakt dat het PEH en bijbehorende IEA geen blauwdruk (kunnen) zijn voor hoe de energiehoofdstructuur er in 2050 uitziet. Het geeft wel visie en richting aan de ontwikkeling richting de toekomstige energiehoofdstructuur. Om zo veel mogelijk recht te doen aan deze dynamiek is het PEH cyclisch (ongeveer elke 4 jaar) van karakter en komt in afstemming met andere opgaven tot stand. Daarnaast is gedurende het IEA-onderzoek gekeken naar de invloed van nieuwe informatie in een verschillen- en gevoeligheidsanalyse waaronder de ophoging van de nationale klimaatdoelstellingen.

In het toekomstige energiesysteem krijgt elektriciteit een veel grotere rol en gas een veel minder grote rol. De aard van de energieproductie verandert drastisch; met hernieuwbare energiebronnen waarbinnen de opwek uit windenergie op zee een groot aandeel heeft. In het toekomstige energiesysteem worden als ‘nieuwe’ onderdelen elektrolysers, batterijen, geothermie en meer CO_2-vrije regelbare centrales grootschalig ingezet. Dit leidt gezamenlijk tot veel meer benodigde en anders ingerichte ruimte voor de energie-infrastructuur.

[1] De IEA is ook een planmilieueffectrapport (MER). Het maken van een planMER is verplicht (paragraaf 16.4.1 Omgevingswet) voor een programma dat het kader vorm voor m.e.r.-(beoordelings)plichtige besluiten zoals de aanleg van een buisleiding of hoogspanningsverbinding.

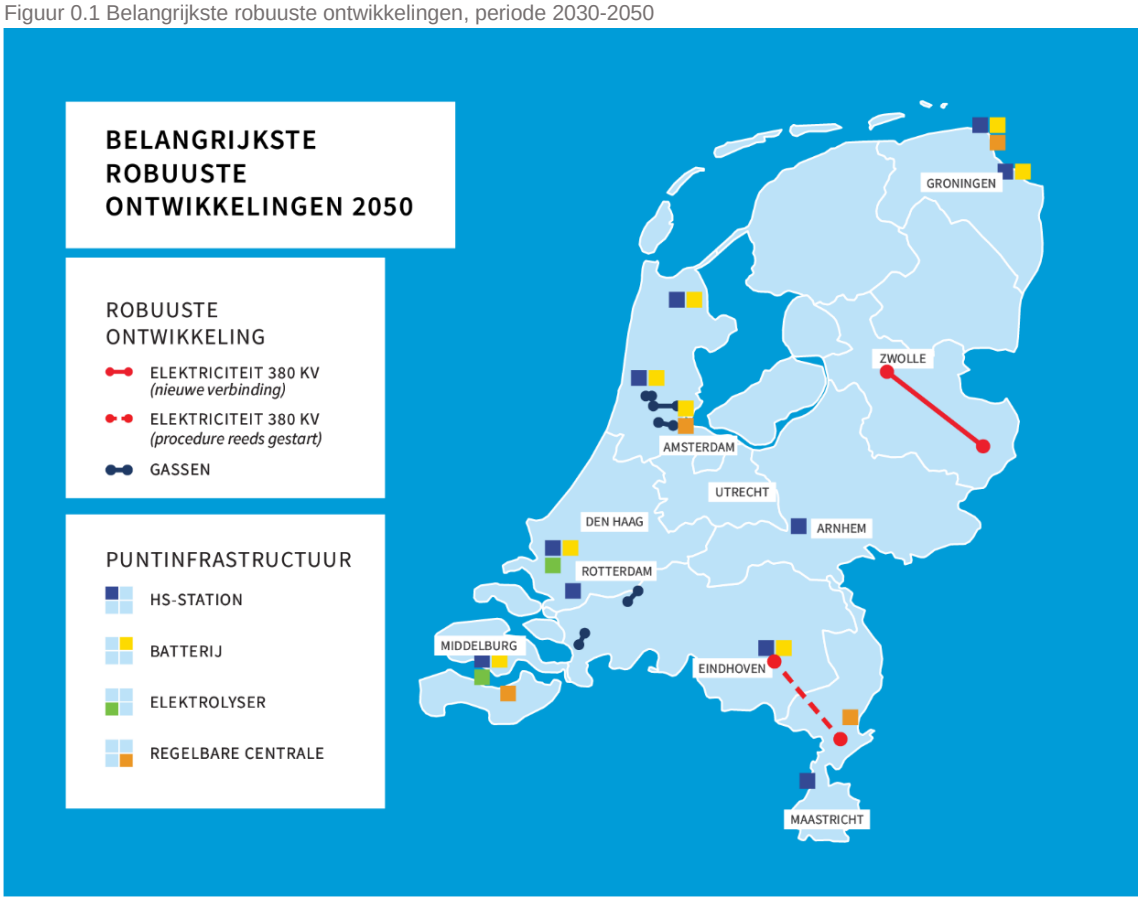
[2] Een programma is een kerninstrument onder de omgevingswet. PEH is specifiek bedoeld om de beleidsdoelen m.b.t. de energie-infrastructuur uit de Nationale Omgevingsvisie (NOVI) verder uit te werken en te operationaliseren.

Om de toekomst van 2050 en de complexiteit van het energiesysteem te omvatten, is er in de IEA gewerkt met zeven scenario's die zijn doorgerekend door de netbeheerders[3]. Deze scenario's verschillen van elkaar in energetische invulling (bijv. hogere en lagere energievraag per sector, hoeveelheid import en export van energie, hoeveelheid opwek elektriciteit d.m.v. zonne-, wind- of kernenergie, hoeveelheid productie van warmte met geothermie) en ruimtelijke invulling (bijv. gespreide of geclusterde opwek en opslag van energie).

De scenario's kunnen gezien worden als hoekpunten van het mogelijke energiesysteem in 2050; het uiteindelijke energiesysteem ligt waarschijnlijk tussen de scenario's in. Het doel van het gebruik van uiteenlopende scenario's is om inzicht te krijgen in de effecten van de potentiële toekomstige ontwikkelingen van de energie-infrastructuur. In deze IEA is onderzocht welke ontwikkelingen tot 2050 nodig zijn, boven op de geplande ontwikkelingen tot 2030.

Hierbij is onderscheid gemaakt in robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes/systeemontwikkelingen. Robuuste ontwikkelingen vinden in elk scenario plaats en hiervoor is in elk geval ruimte noodzakelijk tot 2050. Daarnaast geven de verschillen tussen de scenario's inzicht in de keuzes die gemaakt kunnen worden richting 2050 en de (ruimtelijke) effecten daarvan; deze zijn aangeduid als structuurkeuzes.
In Figuur 0.1 staan de belangrijkste robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes die in de IEA zijn beoordeeld op hun effecten.

Figuur 0.1 Belangrijkste robuuste ontwikkelingen, periode 2030-2050



[3] Deze zijn gebaseerd op de eerste versie van II3050-scenario's (Netbeheer Nederland, 2021).

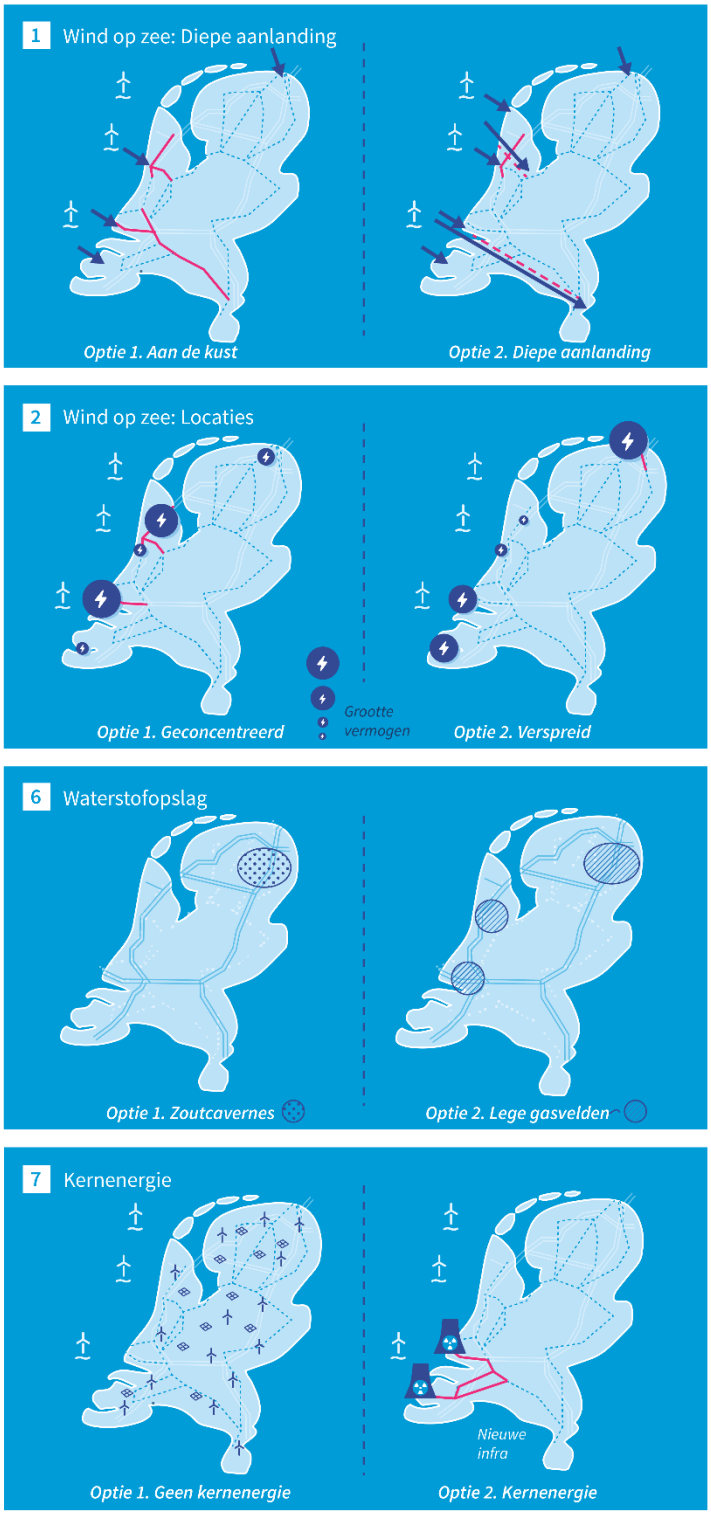
Figuur 0.2 Figuur Structuurkeuzes en systeemontwikkelingen

STRUCTUURKEUZES

1. Aanlanding van wind op zee aan de kust of diepe aanlanding
2. Aanlanding wind op zee, geconcentreerd of gespreid aan de kust
3. Locaties hernieuwbare opwek op land na 2030
4. Locaties clusters van elektrolysers
5. Spreiding of clustering regelbare centrales
6. Waterstofopslag in zout-cavernes of lege gasvelden
7. Toepassing van kernenergie
8. Binnenlandse productie synthetische brandstoffen of import
9. Faciliteren doorvoer grondstoffen naar buitenland
10. Restwarmte of geothermie

SYSTEEM-ONTWIKKELINGEN:

1. Maximale elektrificatie
2. Maximaal gebruik waterstof
3. Maximaal gebruik groengas/ methaan



IEA staat voor een integrale analyse van effecten aan de hand van de thema's Systeemefficiëntie, Milieu & Ruimte, Welvaart, Uitvoerbaarheid & Doelbereik. De vraag die centraal staat bij ieder thema is:

- Systeemefficiëntie: hoe worden vraag en aanbod van energie zo goed mogelijk op elkaar afgestemd bij diverse ontwikkelingen van energie-infrastructuur?
- Milieu & Ruimte: (1) wat is het ruimtebeslag van de verschillende elementen van het energiesysteem en (2) welke ruimtelijke en milieueffecten (zoals natuur en landschap) ontstaan er bij diverse ontwikkelingen van energie-infrastructuur?
- Welvaart: welke (in)directe welvaartseffecten ontstaan er door diverse ontwikkelingen van energie-infrastructuur?
- Uitvoerbaarheid: welke ruimte voor uitbreidingen van energie-infrastructuur is er naar verwachting in de periode 2030-2040 en welke ruimte is er na 2040 nodig? Doelbereik: in welke mate kunnen de drie NOVI-afwegingsprincipes ingevuld worden bij de geschetste uitbreidingen van de infrastructuur?

Gedurende het onderzoek en het opstellen van de IEA heeft er veel afstemming plaatsgevonden met andere (beleids)trajecten en organisaties en zijn er diverse participatiebijeenkomsten georganiseerd. De Commissie voor de m.e.r is ook geraadpleegd.

Belangrijkste conclusies

Het is niet bekend hoe de energievoorziening er in 2050 precies uitziet, maar op basis van de verkende scenario's en gevoeligheidsanalyses, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

In het toekomstige energiesysteem is naar verwachting:

1. Veel ruimte nodig voor de diverse onderdelen van de elektrische infrastructuur: centrales, converter- en hoogspanningsstations en -verbindingen, elektrolysers, batterijen.
2. Geen extra ruimte nodig voor buisleidingen na de ombouw van delen van het aardgasnet naar een waterstofnet. Wel zijn aansluitleidingen nodig naar grootschalige elektrolysers, opslaglocaties van waterstof en regelbare centrales.
3. Ruimte nodig voor enkele hoofdtransportleidingen voor warmtelevering.
4. Geen extra ruimte nodig voor overige buisleidingen.

Op de (industriële) kustlocaties komen veel zaken samen: aanlanding (en afvoer) van windenergie op zee, een grote energievraag van de industrie, de inzet van elektrolyse en batterijen en op twee locaties de mogelijke inzet van kernenergie. Het clusteren van diverse functies van vraag en aanbod betekent minder benodigde infrastructuur om de energie te transporteren. Echter door de hoeveelheid benodigde energie-infrastructuur (ter plaatse en naar achterland) ontstaat op veel locaties ruimtedruk en een grote kans op effecten van de energie-infrastructuur. Niet alleen bij de grote industrieclusters (ook Barro-locaties), maar ook bij de overige Barro-locaties én bestaande hoogspanningsstations is extra ruimte nodig voor regelbare centrales, converterstations, elektrolysers en/of batterijen. Mogelijk is de ruimtebehoefte groter dan de beschikbaarheid, waardoor uitbreiding van deze locaties noodzakelijk is. Het is daarom belangrijk om nader te kijken naar de overgang tussen de huidige invulling van de industrieclusters en de invulling hiervan in 2050. Dit kan kansen bieden om gebieden opnieuw in te richten en kan ook een antwoord zijn op de ruimtevraag van de energie-infrastructuur.

Voor elektrolysers is met name meer ruimte nodig op de industriële locaties waar windenergie op zee aanlandt en er grootschalige waterstofvraag is door de benodigde industriële toepassing van waterstof. Grootschalige elektrolyse, buiten aanlandingslocaties van windenergie op zee, leidt tot extra elektrische infrastructuur in gebieden waar de ruimtedruk al erg hoog is.

Hoogspanningsstations zijn een belangrijk onderdeel in het toekomstige energiesysteem: er zijn uitbreidingen (extra ruimte) bij bestaande hoogspanningsstations en op verschillende locaties nieuwe stations nodig. Om de schaarse ruimte zo goed mogelijk te benutten en extra infrastructuur te voorkomen, is er naast ruimte voor het station op deze locaties ook ruimte nodig voor elektrolysers, batterijen en regelbare centrales. Op veel locaties (industrie en bij hoogspanningsstations) is ruimte nodig voor opslag met batterijen om netverzwaring landinwaarts te voorkomen. Er is ook een groot vermogen nodig aan regelbare centrales; alleen batterijen kunnen onvoldoende zorgen voor altijd beschikbare elektriciteitsproductie.

Uit de analyse blijkt dat milieu en ruimtelijke effecten voornamelijk op de occupatielaag (o.a. leefomgeving) en ondergrondlaag (o.a. natuur en landschap) worden verwacht. Rondom de industrieclusters en Barrolocaties gaat de uitbreiding voor puntinfrastructuur gepaard met effecten op landbouw en nabijgelegen woonkernen. Nieuwe hoogspanningsverbindingen hebben met name een grote impact op het landschap en (beschermde) natuur. Het goed inpassen en zo veel mogelijk beperken van dit ruimtebeslag en voorkomen van noodzaak tot aanleg van extra infrastructuur is van belang omdat het vooral nodig is in gebieden met een grote bestaande ruimtedruk (industrieclusters en stedelijke omgeving). Dit kan worden bewerkstelligd door de benodigde ruimte voor puntinfrastructuur (elektrolysers, batterijen, regelbare centrales, hoogspanningsstations) zoveel mogelijk te koppelen en/of te combineren om ruimte zo efficiënt mogelijk te benutten.

Om het gebruik van kernenergie mogelijk te maken, moeten de waarborgingslocaties kernenergie worden gecontinueerd. Aandachtspunt is dat op de huidige locaties Borssele/Sloegebied en Maasvlakte, de combinatie van grote vermogens kernenergie met aanlanding van grote hoeveelheden windenergie op zee, mogelijk extra netverzwaring vergt om de elektriciteit landinwaarts te transporteren. Hier gaan landschappelijke, ecologische en ruimtelijke effecten mee gepaard.

Clustering van duurzame opwek (wind en zon) op land na 2030 heeft vanuit energetisch oogpunt geen voorkeur boven spreiding van duurzame opwek. Voor Milieu & Ruimte zijn er landelijk gezien minder effecten bij clustering op landschap, natuur en leefomgeving. Lokaal zijn wel grote effecten te verwachten op landschap, natuur en leefomgeving op de locaties waar de clustering plaatsvindt.

Voor de opslag van waterstof zijn – afhankelijk van de ontwikkelingen – zowel seizoensopslag in zoutcavernes en mogelijk ook in gasvelden nodig. De technische haalbaarheid en risico's voor met name deze laatste vorm van opslag, dienen goed te worden onderzocht.

Warmtetransportleidingen zijn waarschijnlijk nodig in Zuid-Holland, Noord-Brabant, Gelderland en Groningen om grootschalige warmtebronnen te koppelen aan de warmtedistributie-gebieden.

Op dit moment is de ruimte voor de energie-infrastructuur onvoldoende gewaarborgd. Een belangrijke aanbeveling is om gereserveerde of additioneel nog te reserveren ruimte ook te handhaven en zodoende vrij te houden voor energie-infrastructuur. Gebleken is dat bij delen van enkele ondergrondse leidingtracés en binnen een aantal Barro-locaties de ruimte (deels) niet meer beschikbaar is. Dit betekent ook:

1. Behoud bestaande Barro-locaties voor grootschalige elektriciteitsproductie-eenheden, bij voorkeur in combinatie met elektrolysers, hoogspanningsstations, converterstations en batterijen.
2. Behoud reserveringen voor bestaande locaties voor hoogspanningsstations en -verbindingen om de ruimte in de toekomst te kunnen blijven gebruiken voor de energie-infrastructuur.
3. Behoud bestaande locaties en reserveringen voor buisleidingen om de ruimte in de toekomst te kunnen blijven gebruiken voor de energie-infrastructuur. Dit betreft ook het behoud van mogelijk buitengebruik-vallende private buisleidingen.
4. (Actualisatie van) ruimtelijke reservering voor gerealiseerde projecten of projecten van TenneT en Gasunie waarvoor de besluiten onherroepelijk zijn. En het aanwijzen ontwikkelrichtingen voor geplande uitbreidingen van de energie-infrastructuur, zoals opgenomen in de investeringsplannen IP2022 van Gasunie en TenneT, voor zover buiten ruimtelijke reserveringen.
5. Maatwerk en een overkoepelende blik gezien de omvang van de opgave en vaak structurerende aard van energie-infrastructuur. Kijk in gebieden naar kansen voor meervoudig ruimtegebruik en naar regionale verschillen. Ook is een overkoepelende blik nodig om zowel voor gebieden de verschillende transities samen op te pakken als landelijk de (beeld)kwaliteit en de realisatie van de energie-infrastructuur te waarborgen.

1 Inleiding, doel en kader integrale effectenanalyse PEH

1.1 Aanleiding en nut & noodzaak voor PEH en IEA/planMER

Voor u ligt de Integrale Effectanalyse (IEA) van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) 2023. Het PEH is het ruimtelijk plan dat gaat over de ontwikkeling van energie-infrastructuur van nationaal belang (hoofdstructuur) tussen 2030 en 2050 die nodig is voor een klimaatneutraal energiesysteem[4].

Nederland staat de komende jaren voor de opgave om een energietransitie te realiseren. Leidend hierbij zijn de afspraken uit het Klimaatakkoord en internationale afspraken om de uitstoot van CO_2 te reduceren. Naast het behalen van deze klimaatdoelstellingen, is het waarborgen van de leveringszekerheid van de energievoorziening een grote drijfveer achter de energietransitie.

In het toekomstige energiesysteem krijgt elektriciteit een veel grotere rol en gas een veel minder grote rol door de uitfasering van fossiele energie. Hierbij veranderen ook de aard en locaties van de productie van energie drastisch. De energieproductie vindt plaats met hernieuwbare energiebronnen waaronder een groot aandeel voor windenergie op zee. Omdat de productie meer volatiel (veranderlijk) is en er nieuwe energiedragers (zoals waterstof) nodig zijn, wordt naast regelbare (energie)centrales grootschalig ingezet op nieuwe onderdelen zoals batterijen en elektrolysers. Dit leidt tot meer benodigde en anders ingerichte ruimte voor de energie-infrastructuur. Het doel van het Programma Energiehoofdstructuur is om tijdig ruimte te reserveren voor deze energie-infrastructuur. De noodzaak voor het PEH komt voort uit:

1. De energie-infrastructuur is één van de kritische succesfactoren voor het tijdig halen van klimaat-doelstellingen (tijdig voldoende ruimte nodig). In het regeerakkoord 2022 staat voor 2030 55% CO_2-reductie als hard doel en 60% als streven. Voor 2035 gaat het om 70%, in 2040 om 80% en CO_2-neutraal in 2050.
2. De ruimtedruk in Nederland is groot en vraagt om een integrale afweging met andere opgaven en belangen.
3. Het energiesysteem wordt steeds meer een geïntegreerd energiesysteem (samenhang tussen onderdelen neemt toe).

Dit Programma Energiehoofdstructuur 2023 is de eerste in zijn soort, kent een horizon van 2050 en vindt plaats in een continue veranderende (energie)wereld. Dit maakt dat het PEH en bijbehorende IEA geen blauwdruk (kunnen) zijn voor hoe de energiehoofdstructuur er in 2050 uitziet. Het geeft wel visie en richting aan de ontwikkeling richting de toekomstige energiehoofdstructuur. Om zo veel mogelijk recht te doen aan deze dynamiek is het PEH cyclisch (ongeveer elke 4 jaar) van karakter en komt in nauwe afstemming met andere opgaven en programma's tot stand.

1.2 Scope en afbakening PEH en IEA

Het Programma Energiehoofdstructuur is specifiek bedoeld om de beleidsdoelen m.b.t. de nationale energie-infrastructuur uit de Nationale Omgevingsvisie (NOVI) uit te werken en te operationaliseren[5].
Het doel van het programma is om tijdig ruimte te reserveren voor deze energie-infrastructuur.
Het PEH heeft betrekking op ruimtelijk beleid op land en de grote wateren. Het gaat dus over het gehele Nederlandse grondoppervlak, uitgezonderd de Noordzee. Het PEH 2023 bevat een update van de

[4] Om klimaatneutraal te zijn, moet het energiesysteem overgaan op hernieuwbare (duurzame) energievormen.
[5] Zie paragraaf 4.2.1 NOVI (september 2020) Prioriteit 1 Ruimte voor klimaat en energietransitie en dan Beleidskeuze 1.3 'We maken de energie-infrastructuur geschikt voor duurzame energiebronnen en reserveren daarvoor ruimte'.

Structuurvisie Buisleidingen en het Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III).
In het PEH worden drie soorten uitspraken opgenomen:

1. (Bestaande) reserveringen.
2. Ruimtelijke ontwikkelrichtingen.
3. Generiek beleid.

Deze uitspraken gaan over de benodigde energiehoofdstructuur voor elektriciteit, (brand)stoffen (grondstoffen, waterstof, CO_2, methaan) en warmte (bovenregionale warmtenetten). PEH vormt daarmee het kader voor en wordt verder uitgewerkt in projecten voor de realisatie van de energiehoofdstructuur.

Om de toekomst van 2050 en de complexiteit van het energiesysteem te omvatten, is er in de IEA gewerkt met zeven scenario's[6] die zijn doorgerekend door de netbeheerders. Deze scenario's verschillen van elkaar in energetische invulling (bijv. hogere en lagere energievraag per sector, hoeveelheid import en export van energie, hoeveelheid opwek elektriciteit d.m.v. zonne-, wind- of kernenergie, hoeveelheid productie van warmte met geothermie) en ruimtelijke invulling (bijv. gespreide of geclusterde opwek en opslag van energie). De scenario's kunnen gezien worden als hoekpunten van het mogelijke energiesysteem in 2050; dit ligt waarschijnlijk tussen de scenario's in. Het doel is om inzicht te krijgen in de effecten van de potentiële toekomstige ontwikkelingen van de energie-infrastructuur, die zijn aangeduid met de termen robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes (zie voor uitleg paragraaf 2.6 en paragraaf 2.7). De volgende onderdelen van deze potentiële ontwikkelingen van energie-infrastructuur zijn in de IEA beoordeeld op hun effecten:

- hoogspanningsverbindingen (bovengronds en ondergronds);
- buisleidingen (ondergronds);
- puntinfrastructuur: hoogspanningsstations, regelbare centrales, elektrolysers, opslag waterstof en batterijen.

1.3 Proces van totstandkoming van de IEA/planMER

1.3.1 Programma en plan-m.e.r.-plicht

Een programma is een kerninstrument onder de Omgevingswet[7]. Een programma is vergelijkbaar met de term structuurvisie; deze term komt te vervallen met de invoering van de Omgevingswet. Het PEH valt onder het type 'vrijwillig programma'. De Omgevingswet stelt geen vormvereisten aan de inhoud van dit type programma.

Het programma is zelfbindend voor het Rijk en zal daarmee kaderstellend zijn voor besluiten van het Rijk, zoals rijksinpassingsplannen of projectbesluiten. Juridische doorwerking kan met het programma als beleidsmatige basis, gerealiseerd worden via andere instrumenten uit de Omgevingswet. Bijvoorbeeld het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl), waarin algemene regels staan waar decentrale overheden rekening mee moeten houden in hun plannen voor de leefomgeving.

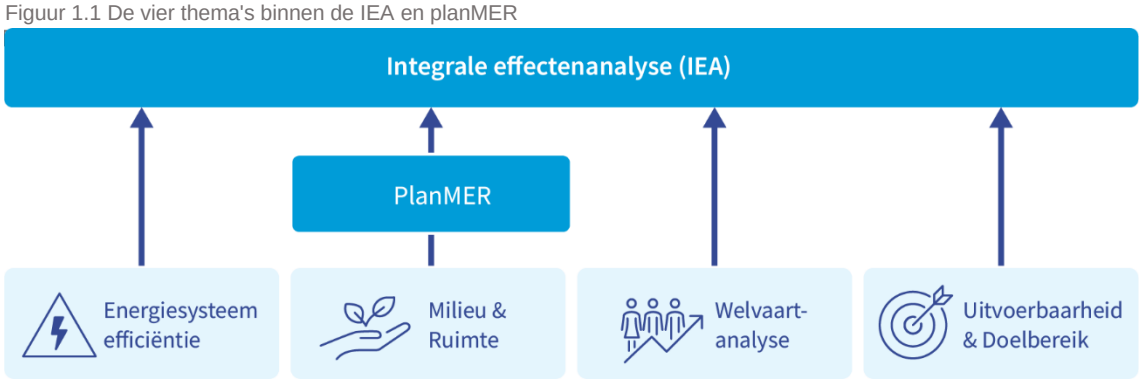
[6] Deze zijn gebaseerd op de eerste versie van II3050-scenario's (Netbeheer Nederland, 2021). Ten tijde van de afronding van dit MER is een tweede versie gepubliceerd (Netbeheer Nederland, 2023). Deze was niet op tijd gereed om mee te nemen in deze IEA, wel is dit meegenomen in de verschillen- en gevoeligheidsanalyse (Bijlage XV).

[7] De Omgevingswet is ten tijde van het opstellen van deze IEA en PEH 2023 uitgesteld naar 1 januari 2024. PEH 2023 en de bijbehorende IEA anticiperen op deze inwerkingtreding.

Het maken van een planMER (milieueffectrapport) is verplicht (paragraaf 16.4.1 Omgevingswet) voor een programma dat het kader vormt voor m.e.r.-(beoordelings)plichtige besluiten zoals de aanleg van een buisleiding of hoogspanningsverbinding. Voor PEH geldt daarmee een plan-m.e.r.-plicht[8]. De wettelijke basis voor milieueffectrapportage (m.e.r.) ligt in Europa. De Europese richtlijn voor strategische milieu-beoordeling (SMB-richtlijn)[9] regelt m.e.r. voor plannen en programma's. De Nederlandse wetgeving rond de milieueffectrapportage is opgenomen in afdeling 16.4 van de Omgevingswet en in Hoofdstuk 11 en Bijlage V bij het Omgevingsbesluit.

Doel van m.e.r. is om milieu een volwaardige plaats te geven in de besluitvorming. Voor dit programma is gekozen om naast de milieueffecten van mogelijke keuzes, breder te kijken waaronder maatschappelijke kosten en baten en effecten op het energiesysteem. Deze IEA is daarmee ook een planMER. De samen-hang is verbeeld in volgende afbeelding.

Figuur 1.1 De vier thema's binnen de IEA en planMER



Deze IEA bevat een integrale analyse van effecten aan de hand van de thema's Systeemefficiëntie, Milieu & ruimte, Welvaart, Uitvoerbaarheid & Doelbereik. De centrale vraag bij ieder thema is:

- Systeemefficiëntie: hoe worden vraag en aanbod van energie zo goed mogelijk op elkaar afgestemd bij diverse ontwikkelingen van energie-infrastructuur?
- Milieu & Ruimte: (1) wat is het ruimtebeslag van de verschillende elementen van het energiesysteem en (2) welke ruimtelijke en milieueffecten (zoals natuur en landschap) ontstaan er bij diverse ontwik-kelingen van energie-infrastructuur?
- Welvaart: welke (in)directe welvaartseffecten ontstaan er door diverse ontwikkelingen van energie-infrastructuur?
- Uitvoerbaarheid & Doelbereik: welke onderdelen zijn er tot en na 2040 nodig en in welke mate kunnen de afwegingsprincipes van de NOVI ingevuld worden bij de geschetste ontwikkelingen?

Het detailniveau van de IEA past bij het schaalniveau van een nationaal programma zoals het Programma Energiehoofdstructuur. Dit betekent voor de IEA dat effecten op hoofdlijnen worden beschouwd en er (nog) geen gedetailleerde projectinvulling en effectbeoordeling op locatieniveau plaatsvinden.

[8] De afkorting MER wordt gebruikt om het product van het milieurapport aan te duiden en m.e.r. wordt gebruikt om de procedure van begin tot einde aan te duiden.

[9] Richtlijn 2001/42/EG over de beoordeling van de gevolgen voor het milieu van bepaalde plannen en programma's.

1.3.2 Doorlopen stappen

In een kamerbrief en de startnotitie PEH is het programma in mei 2020 aangekondigd en is de scope afgebakend[10]. In de Notitie Reikwijdte en Detailniveau (NRD) is aangegeven wat er op welke manier onderzocht gaat worden in de IEA/planMER voor PEH 2023[11]. De resultaten van het IEA-onderzoek worden gebruikt voor het opstellen van het PEH. In Tabel 1.1 zijn de verschillende stappen beschreven waarin de IEA/planMER tot stand is gekomen. Participatie is een belangrijke pijler onder de Omgevingswet. In Tabel 1.1 en in de participatieverslagen[12] staat beschreven hoe participatie heeft plaatsgevonden gedurende de totstandkoming van de IEA en PEH.

Tabel 1.1 Doorlopen stappen NRD en IEA/planMER

Stap	Omschrijving	Omschrijving participatie
NRD-fase		
Opstellen concept-NRD Juli 2020-april 2021	Kaders neer te zetten van het onderzoek, de alternatieven en beoordelingskaders voor de IEA/planMER.	Belanghebbende partijen (o.a. netbeheerders, rijks- en decentrale overheden, belangenorganisaties) hebben op verschillende manieren meegedacht en informatie aangeleverd over reikwijdte en detailniveau van alternatiefontwikkeling en thema's.
Publicatie concept-NRD en participatieplan April 2021	De concept-NRD is samen met het participatieplan gepubliceerd.	Mogelijkheid tot het indienen van zienswijzen en aandragen reacties op participatieplan.
Zienswijzen, periode 30 april-10 juni 2021 Advies Commissie m.e.r., 23 juni 2021	Er zijn 47 zienswijzen op de concept-NRD ingediend. De commissie heeft op 23 juni 2021 een advies uitgebracht (zie voor inhoudelijke toelichting paragraaf 1.3.3).	Beantwoording zienswijzen en gesprek Commissie m.e.r. en ook maken participatieverslag.
Vaststelling definitieve NRD oktober 2021	Nadat beantwoording van de zienswijzen in een nota van antwoord en na het advies van de Commissie m.e.r. is de NRD definitief vastgesteld.	Er is afgewogen welke zaken uit zienswijzen en advies Commissie m.e.r. worden meegenomen in de aanpak voor de IEA. Men heeft kennisgenomen van de definitieve NRD en daarmee aanpak voor de IEA/planMER.
IEA/planMER-fase		
Opstellen IEA/planMER, medio 2021-januari 2023	Onderzoeken van effecten van potentiële ontwikkelingen van het toekomstige energiesysteem aan de hand van verschillende thema's en dit vastleggen in de IEA/planMER.	Belanghebbende partijen (o.a. netbeheerders, rijks- en decentrale overheden, belangenorganisaties) hebben op verschillende manieren en momenten meegedacht en informatie aangeleverd voor het onderzoek en de uitkomsten.
Publicatie ontwerp programma met IEA/planMER, tweede kwartaal 2023 verwacht	N.v.t.	Men kan een zienswijze indienen op het ontwerp programma en de IEA/planMER
Zienswijzen en advies Commissie m.e.r., derde kwartaal 2023 verwacht	Naast het indienen en beantwoorden van zienswijzen wordt er in deze fase advies gevraagd aan de Commissie m.e.r.	Er wordt afgewogen welke zaken uit zienswijzen en advies Commissie m.e.r. meegenomen worden in het definitieve programma.

[10] Kamerbrief: www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/05/20/kamerbrief-over-afbakening-programma-energiehoofdstructuur. Startnotitie: www.rvo.nl/sites/default/files/2020/12/Startnotitie-Programma-Energiehoofdstructuur.pdf

[11] De NRD is te vinden via www.rvo.nl/sites/default/files/2021/04/Concept-Notitie-Reikwijdte-en-Detailniveau-Programma-Energiehoofdstructuur.pdf. In oktober 2021 is de Nota van Antwoord en daarmee de NRD definitief vastgesteld door de staatssecretaris van EZK – Klimaat en Energie en de minister van BZK.

[12] Zie www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/lopende-projecten/peh

Stap	Omschrijving	Omschrijving participatie
Vaststellen definitief programma, vierde kwartaal 2023 verwacht	N.v.t.	Men kan kennisnemen van het definitieve programma.

Advies NRD-fase Commissie m.e.r.

In paragraaf 1.2 van Bijlage X staat een tabel met de aanbevelingen uit het advies van de Commissie m.e.r. op de NRD. Er is daarbij aangegeven waar de belangrijkste aanbevelingen zijn geland in deze IEA/planMER en in het programma PEH 2023. De aanbevelingen gaan zowel over de beleidscontext, de alternatiefontwikkeling (scenario's) als over de inhoud van met name het thema Milieu & Ruimte (bijv. natuur, landschap en bodem en water).

1.4 Beleidscontext van het Programma Energiehoofdstructuur

PEH bouwt voort op bestaand beleid en komt in samenhang met diverse andere trajecten en programma's tot stand. In de onderstaande tabel is de beleidscontext van het PEH 2023 opgenomen waarbij ook is ingegaan op de samenhang met de meest relevante andere beleidstrajecten en programma's, in Bijlage III staat een uitgebreide omschrijving van de verschillende trajecten en programma's.

Tabel 1.2 Beleidscontext PEH en samenhang andere trajecten en programma's

Korte beschrijving inhoud kader	Relevant voor IEA/PEH
Klimaatakkoord (juni 2019)	• Doel/ Nut en Noodzaak • Uitgangssituatie 2030
Europese Green Deal (december 2019)	• Doel/ Nut en Noodzaak • Uitgangssituatie 2030
Nationale Omgevingsvisie (september 2020)	• Nut en noodzaak (PEH is programma onder NOVI) • Alternatiefontwikkeling (ruimtelijke principes) • Beoordelingsmethodiek (thema Milieu & Ruimte, thema Doelbereik) • Afweging (o.a. andere toekomstige ontwikkelingen)
Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III) (2009)	• Doel/ Nut en Noodzaak: PEH vervangt SEV III • Alternatiefontwikkeling (o.a. principe bundelen)
Structuurvisie Buisleidingen (SVB) 2012-2035 (2012)	• Doel/ Nut en Noodzaak: PEH vervangt SVB
Structuurvisie Ondergrond (STRONG) (2018)	• Ondergrondse verbindingen, opslag waterstof en geothermie • Beoordelingsmethodiek (thema Milieu & Ruimte, aspect bodem & water) • Afweging
Programma Bodem & Ondergrond	• Programma is nog niet concreet, daarmee is STRONG leidend
Mijnbouwwet (oktober 2002)	• Opslag waterstof en geothermie
Programma Infrastructuur Duurzame Industrie (PIDI) (mei 2021)	• Alternatiefontwikkeling (CES onderdeel scenario's) • Verschillen- en gevoeligheidsanalyse
Nationale Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat (november 2021)	• Alternatiefontwikkeling (MIEK onderdeel scenario's) • Verschillen- en gevoeligheidsanalyse
Routekaart elektrificatie industrie (oktober 2021)	• Alternatiefontwikkeling (scenario's) • Verschillen- en gevoeligheidsanalyse
Delta Rhine Corridor	• Alternatiefontwikkeling (scenario's) • Beoordelingsmethodiek (thema welvaartanalyse) • Bijlage Buisleidingen, brandstoffen, grondstoffen en CO_2
Programma Energiesysteem PES/NPE (ontwerp juni 2023 en definitief 2024)	• Afstemming en uitwisseling tussen NPE en PEH
Nationaal Waterprogramma en Programma Noordzee 2022-2027 (maart 2021)	• Doel (omvang aanbod) • Nut en noodzaak (energietransitie)

Korte beschrijving inhoud kader	Relevant voor IEA/PEH
	• Alternatiefontwikkeling (aansluiten windenergie op zee op landelijk hoogspanningsnet)
Partiële herziening Programma Noordzee (datum onbekend) en EIPN (verwacht begin 2024)	• Doel (omvang aanbod) • Nut en noodzaak (energietransitie) • Alternatiefontwikkeling (aansluiten windenergie op zee op landelijk hoogspanningsnet, en aansluiting import waterstof/ offshore waterstof op landelijke waterstofinfrastructuur)
Verkenning Aanlanding Wind op Zee (VAWOZ) 2030 (december 2021)	• Uitgangssituatie 2030
Voorverkenning VAWOZ 2040 (juli 2022)	• Alternatiefontwikkeling • Afweging • Aanleveren informatie voor systeemintegratie van PEH aan VAWOZ 2040 • Verschillen- en gevoeligheidsanalyse
Routekaart groen gas (maart 2020)	• Alternatiefontwikkeling (gebruik groengas)
Waterstofstrategie Nederland	• Alternatiefontwikkeling • Afweging
Nationaal Waterstof Programma (2022)	• Alternatiefontwikkeling • Uitgangssituatie 2030 (HyWay 27)
Regionale Energiestrategieën 1.0	• Onderdeel van de alternatiefontwikkeling • Bijlage XV Verschillen- en gevoeligheidsanalyse
Regels ter bescherming van UNESCO-werelderfgoed	• Beoordelingsmethodiek (thema Milieu & Ruimte aspect landschap, cultuurhistorie en archeologie)
Deltaprogramma 2023	• Beoordelingsmethodiek (thema Milieu & Ruimte aspect bodem, grond en (drink)watervoorziening) overstromingsgevoeligheid) • Onderdelen opwek en transport
Omgevingswet, inwerkingtreding voorzien 1 januari 2024	• Programma is uitvoeringsinstrument onder toekomstige Omgevingswet • Proces IEA/PEH anticipeert op nieuwe Omgevingswet

1.5 Samenhang hoofdrapport en achterliggende bijlagen en leeswijzer

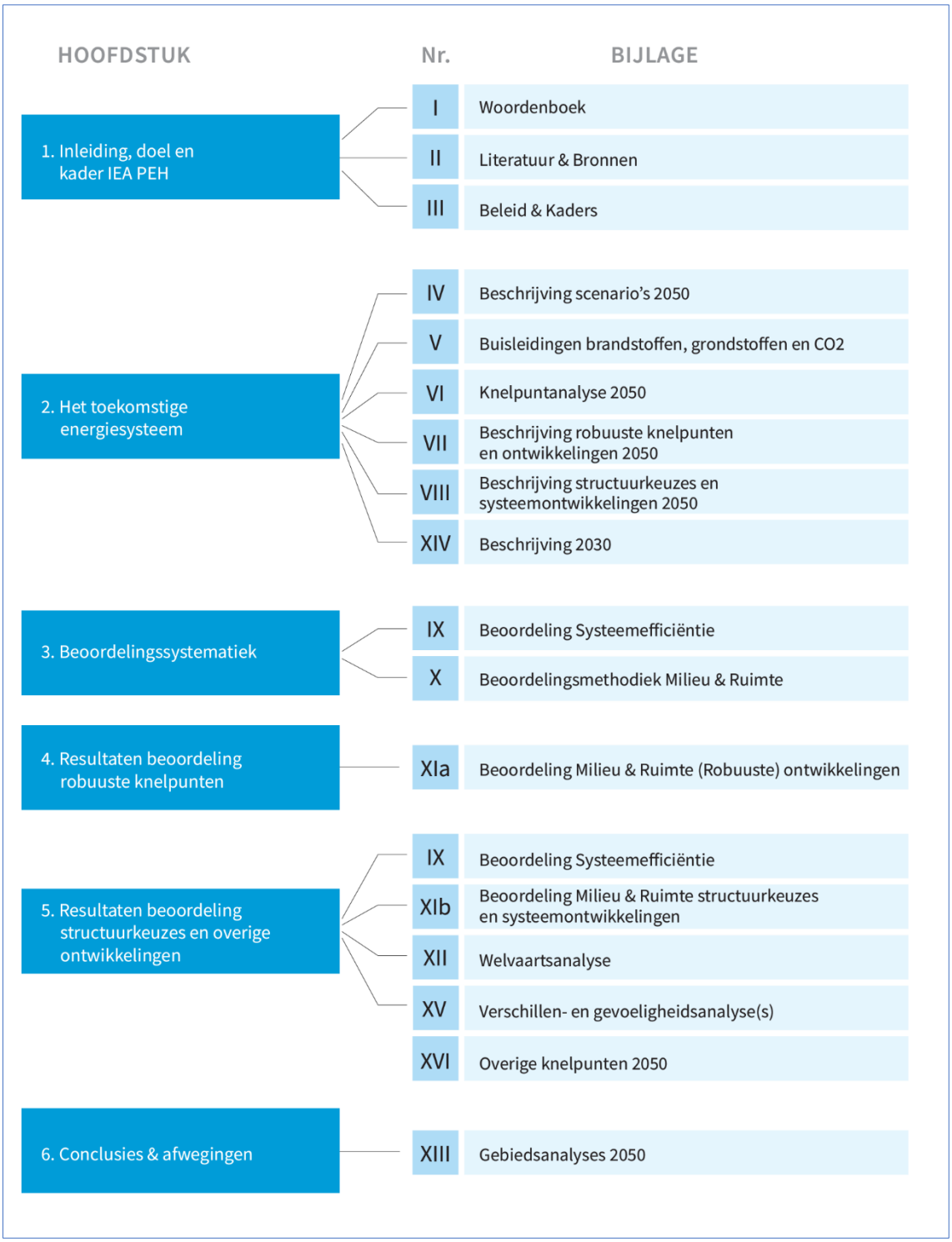
De IEA is het resultaat van verschillende achterliggende onderzoeken en analyses. Onderliggend 'hoofd-document' geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van het onderzoek dat in verschillende onderdelen in meer detail in de achterliggende notities (zie bijlagen) zijn opgenomen.

In hoofdstuk 1 zijn de kaders van de IEA geschetst zoals de nut en noodzaak, afbakening en beleids-context. Hoofdstuk 2 gaat in op de verwachte ontwikkelingen van het toekomstige energiesysteem in 2050. Hierin komen de gebruikte scenario's in de studie, de minimale uitbreidingen van de energie-infrastructuur (robuuste ontwikkelingen), de te maken keuzes in het energiesysteem (structuurkeuzes en systeemontwikkelingen) en de uitgangssituatie (2030) aan bod. Ook wordt de verschillen- en gevoelig-heidsanalyse beschreven. Hoofdstuk 3 licht de beoordelingssystematiek toe van de verschillende thema's (Systeemefficiëntie, Milieu & Ruimte, Welvaartsanalyse en Uitvoerbaarheid & Doelbereik). In hoofdstuk 4 staan de resultaten van de beoordeling van robuuste ontwikkelingen van Milieu & Ruimte. In hoofdstuk 5 volgt de beoordeling van structuurkeuzes voor Systeemefficiëntie, Milieu & Ruimte en Welvaartsanalyse. Uitvoerbaarheid & Doelbereik zijn toegelicht in paragraaf 3.5 en 5.6. Tot slot worden de conclusies en afwegingen behandeld in hoofdstuk 6. Hier worden de conclusies ook kort samengevat per regio.

Zoals aangegeven liggen verschillende notities aan de IEA ten grondslag. Ieder hoofdstuk van de IEA heeft één of meer bijlagen die de informatie uitgebreider beschrijft en/of onderbouwt. In de teksten wordt

ook naar de bijlagenummers verwezen voor meer toelichting. In Figuur 1.2 staat een overzicht van de koppelingen van de hoofdstukken met de bijlagen.

Figuur 1.2 Inhoudelijke koppeling van het IEA/planMER met de verschillende bijlagen



1.6 Belangrijkste begrippen/termen

In de IEA en de bijlagen is een aantal specifiek gedefinieerde begrippen gebruikt die vaak terugkomen. De belangrijkste begrippen worden hieronder (Tabel 1.3) toegelicht zodat deze snel zijn terug te vinden bij het lezen van dit document. In Bijlage I is een woordenlijst te vinden met alle termen en afkortingen die in deze studie worden gebruikt. Daarnaast zijn er ook andere vaktaal en afkortingen gebruikt die zo veel mogelijk bij het eerste gebruik in dit IEA-document toegelicht worden.

Tabel 1.3 Belangrijkste termen uit de IEA

Term	Beschrijving
Element	Grove onderdelen waar het energiesysteem uit is opgebouwd: Netinfrastructuur hoogspanning, Opwek, Opslag, Netinfrastructuur buisleidingen
Effectbeoordeling en thema	Een inschatting van de kans op te verwachten effecten als gevolg van de realisatie van een of meer elementen aan de hand van de vijf beoordelingsthema's. Omdat de exacte technische invulling van de elementen nog niet bekend is wordt gewerkt met een kans op effecten en niet met absolute effecten.
Energie-infrastructuur	Alle infrastructuur in de vorm van kabels, transformatorstations, leidingen en op- en over-slagpunten voor het hoofdenergienetwerk voor zowel elektronen als moleculen. Ook wel energiehoofdstructuur genoemd in deze IEA.
Knelpunt	Een onderdeel in het energiesysteem dat een juiste werking van dit systeem blokkeert. Een knelpunt kan een gebrek of een tekort aan onderdelen zijn. Een knelpunt wordt robuust genoemd als het in alle gebruikte scenario's voorkomt.
Onderdeel	Concrete onderdelen van het energiesysteem zoals hoogspanningsstation, hoogspanningsverbinding, buisleiding, elektrolyser, batterijen. Ieder element kent meerdere onderdelen. Het element 'opslag' bestaat bijvoorbeeld uit de onderdelen opslag elektriciteit, opslag waterstof en opslag methaan.
Robuuste ontwikkeling	Robuuste ontwikkelingen zijn oplossingen voor robuuste knelpunten. Dit zijn knelpunten die in elk scenario in een bepaalde mate voorkomen. Voor de robuuste ontwikkelingen is in elk geval ruimte noodzakelijk tot 2050.
Structuurkeuze	Structuurkeuzes zijn ruimtelijke of energetische keuzes die gemaakt kunnen worden in de ontwikkeling naar een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Per structuurkeuze zijn er twee of meer opties om het doel van de structuurkeuze (bijvoorbeeld het plaatsen van nieuwe regelbare centrales) in te vullen.
Systeemontwikkeling	Ontwikkelingen die afhankelijk zijn van externe factoren, zoals de ontwikkeling van de energieprijzen. Deze systeemontwikkelingen vallen niet precies samen met een van de gebruikte scenario's.
Puntinfrastructuur	Energie-infrastructuur die in vergelijking met lijninfrastructuur ruimtebeslag heeft rondom een specifieke locatie (punt). Deze puntinfrastructuur kan bestaan uit batterijen, elektrolysers, regelbare centrales en (converter)stations.

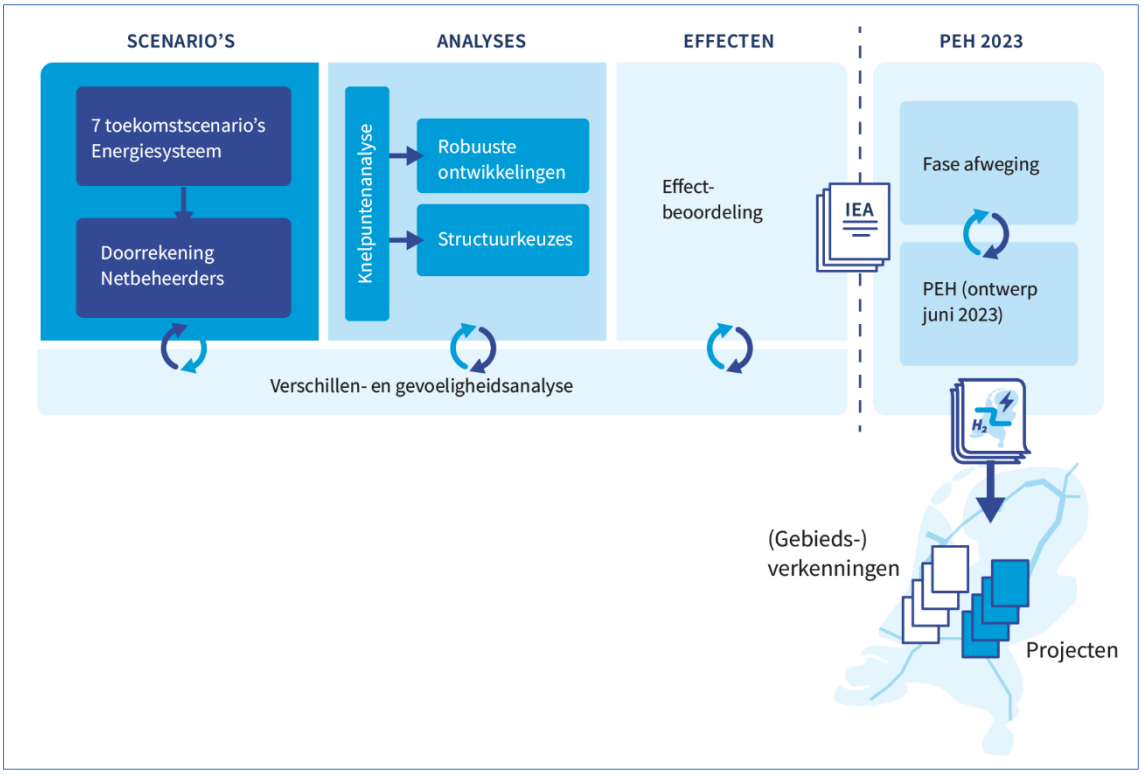
2 Het toekomstige energiesysteem

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de verwachte ontwikkelingen van het energiesysteem tot en met 2050 in kaart gebracht. Hierbij is gekeken naar het energetische en technische aspect. Daarna volgt de beoordeling van Milieu & Ruimte en Uitvoerbaarheid & Doelbereik in de hoofdstukken 4 en 5. Meer informatie over de ontwikkelingen richting het toekomstige energiesysteem staat in Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*, Bijlage VI Knelpuntenanalyse 2050, Bijlage VII Beschrijving robuuste knelpunten en ontwikkelingen 2050, Bijlage VIII Beschrijving structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050, Bijlage XIV Beschrijving 2030 en Bijlage XV Verschillen- en gevoeligheidsanalyse(s).

Figuur 2.1 laat zien hoe er van scenario's naar robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes naar de effectbeoordeling toegewerkt wordt.

Figuur 2.1 Van scenario's naar robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes en effectbeoordeling



Daarbij is gestart met zeven scenario's voor het toekomstige energiesysteem in 2050. Die scenario's gaan elk uit van een klimaatneutraal energiesysteem in 2050, maar verschillen qua opzet (bijvoorbeeld welke CO_2-vrije energiedragers en welke bronnen worden gebruikt). Die scenario's zijn energetisch door-gerekend door de netbeheerders. In die berekening wordt gekeken naar de vraag welke knelpunten er ontstaan in de energie-infrastructuur als gevolg van de invulling in de verschillende scenario's. Die knel-punten worden vervolgens geanalyseerd. Uit die analyse kan blijken dat de knelpunten zich altijd voordoen (in alle scenario's) of alleen bij keuzes voor een bepaalde invulling (structuurkeuze).

Als een knelpunt zich voordoet kan dat worden opgelost door aanpassingen aan de infrastructuur: de ontwikkelingen. Een ontwikkeling wordt robuust genoemd als dit in alle scenario's nodig is. Voor de ontwikkelingen en structuurkeuzes wordt vervolgens onderzocht welke effecten dit heeft en hoe die effecten kunnen worden beoordeeld. Er wordt een verschillen- en gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de effecten van recente ontwikkelingen en beleidsplannen op elk stap van het onderzoek te bepalen.

De voorgaande stappen leiden gezamenlijk tot de IEA die de basis vormt voor de afwegingen die in het PEH worden gemaakt. In de volgende paragrafen worden deze stappen nader toegelicht.

2.2 Van scenario's naar robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes

Op dit moment is het Nederlandse energiesysteem nog grotendeels gebaseerd op fossiele brandstoffen, maar in 2050 moet het energiesysteem volledig klimaatneutraal zijn. Het is echter nog onzeker hoe een klimaatneutraal energiesysteem in 2050 er precies uit gaat zien. Sommige dingen zijn zeker, bijvoorbeeld dat elektrificatie in een groot deel van de sectoren de meest logische verduurzamingsoptie is en dat er daardoor fors meer elektriciteitsvraag gaat komen. Maar in sommige sectoren is het nog onduidelijk hoe de verduurzaming eruit gaat zien. Wordt daar vooral ingezet op elektrificatie of gaat waterstof een grote rol spelen? Daarnaast speelt de vraag of Nederland zijn energie grotendeels zelf wil opwekken of dat veel energie geïmporteerd gaat worden. Dit zijn vragen waar nu nog geen uitgekristalliseerd antwoord op is.

Om de onzekerheid van de ontwikkeling van het energiesysteem op te vangen, is voor deze integrale effectenanalyse gebruikgemaakt van scenario's voor het energiesysteem in 2050. Elk scenario gaat uit van een klimaatneutraal energiesysteem, maar de invulling verschilt per scenario. In totaal zijn zeven scenario's gebruikt. De zeven scenario's geven naar verwachting 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. Er zijn echter enkele ontwikkelingen die niet binnen de hoekpunten vallen en er is gedurende het onderzoek nieuwe informatie verschenen over ontwikkelingen. Deze worden behandeld in de verschillen- en gevoeligheidsanalyses in paragraaf 2.8.

In de zeven scenario's zijn aannames gedaan over de ontwikkeling van vraag en hernieuwbaar aanbod van energie in 2050, opgesplitst naar sector, energiedrager en locatie (zie verdere toelichting in paragraaf 0). Vervolgens hebben de netbeheerders berekend hoeveel regelbare centrales, opslag en conversie noodzakelijk is voor een robuust energiesysteem[13] en waar knelpunten optreden in de energie-infrastructuur (verdere toelichting in paragraaf 2.5).

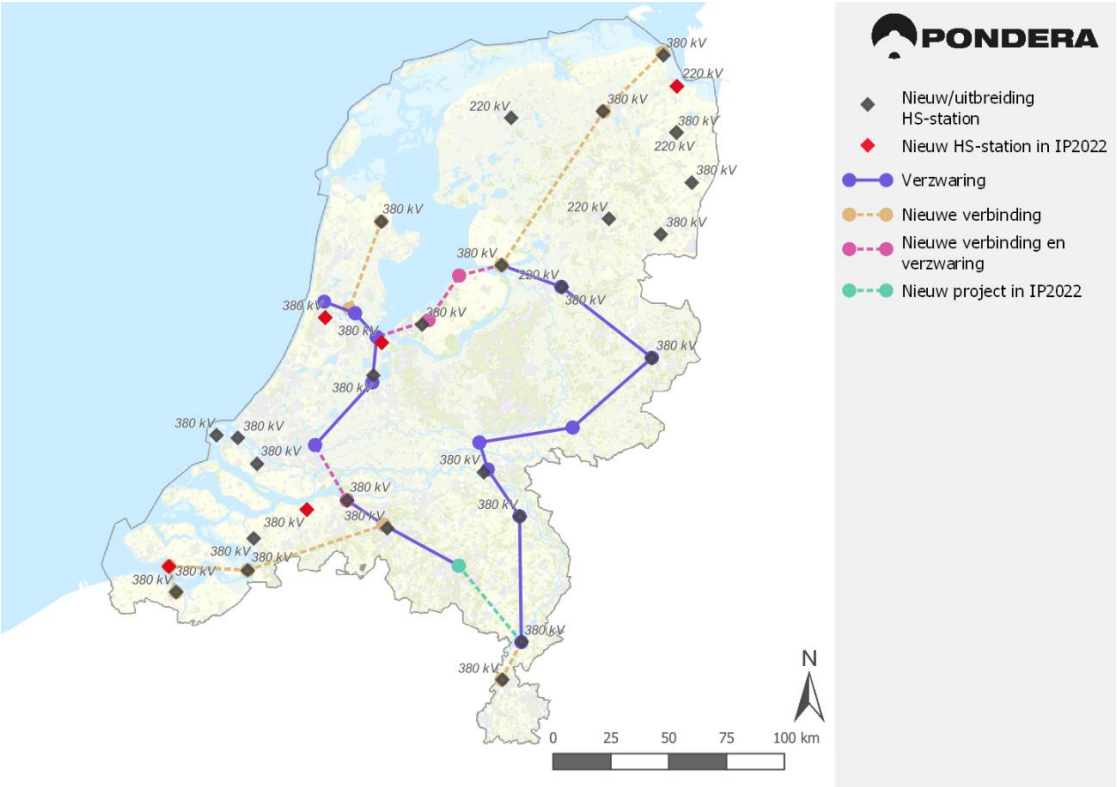
Het doel van het gebruik van scenario's om de hoekpunten van het toekomstige energiesysteem te bepalen is tweeledig. Enerzijds geeft dit inzicht in **robuuste ontwikkelingen** (paragraaf 2.6) die in elk van de scenario's plaatsvinden. Dit zijn ontwikkelingen waar in elk geval ruimte voor noodzakelijk is. Daarnaast geven de verschillen tussen de scenario's inzicht in de keuzes die gemaakt kunnen worden richting 2050, de zogenaamde **structuurkeuzes en systeemontwikkelingen** (paragraaf 2.7), en de (ruimtelijke) effecten daarvan.

[13] Onder een robuust energiesysteem wordt een systeem verstaan waarbij vraag en aanbod van energie op elk moment in het jaar in evenwicht zijn en waarbij de benodigde energie getransporteerd kan worden.

2.3 Uitgangssituatie: huidige situatie en 2030

In de IEA is onderzocht welke ruimte nodig is voor energie-infrastructuur voor de ontwikkeling naar een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Op dit moment is er al veel energie-infrastructuur aanwezig en tot 2030 staan al veel investeringen voor nieuwe projecten op de planning. Zo worden veel uitbreidingen gedaan aan het 380kV-net, worden de 150kV- en 110kV-netten op een andere manier ingericht (met een pocketstructuur[14]) en wordt een landelijk waterstofnetwerk aangelegd. De geplande investeringen door netbeheerders lossen naar verwachting de huidige problemen met netcongestie op.

Figuur 2.2 Schematische weergave geplande uitbreidingen hoogspanningsinfrastructuur IP2020 (TenneT, 2020)



In de analyses van de IEA zijn de huidige situatie en de geplande investeringen tot 2030 de uitgangssituatie. Dit betekent dat aangenomen wordt dat de geplande investeringen in ieder geval gerealiseerd worden. Alleen investeringen die opgenomen zijn in het investeringsplan van netbeheerders of waar een investeringsbeslissing voor gemaakt is, worden meegenomen. De investeringsplannen van de netbeheerders uit 2020 (het IP2020 (TenneT, 2020) en (Gasunie, 2020)[15]), zijn de basis voor de uitgangssituatie. Niet al deze investeringen zullen in 2030 gerealiseerd zijn, sommigen mogelijk ook in 2031 of 2032, maar deze worden wel allemaal meegenomen bij de ontwikkelingen tot 2030. Figuur 2.2 toont de geplande uitbreidingen aan het hoogspanningsnet. In Bijlage XIV staat een uitgebreide beschrijving van de netsituatie in 2030.

[14] In hun visie op het toekomstige hoogspanningsnet voorziet TenneT dat ze de 110kV- en 150kV-netten opsplitsen in kleine deelnetjes, die elk verbonden zijn met één 380kV- of 220kV-station. Zo is er minder transport via de lagere spanningsniveaus noodzakelijk doordat de stroom snel afgevoerd kan worden naar het 380kV- of 220kV-net

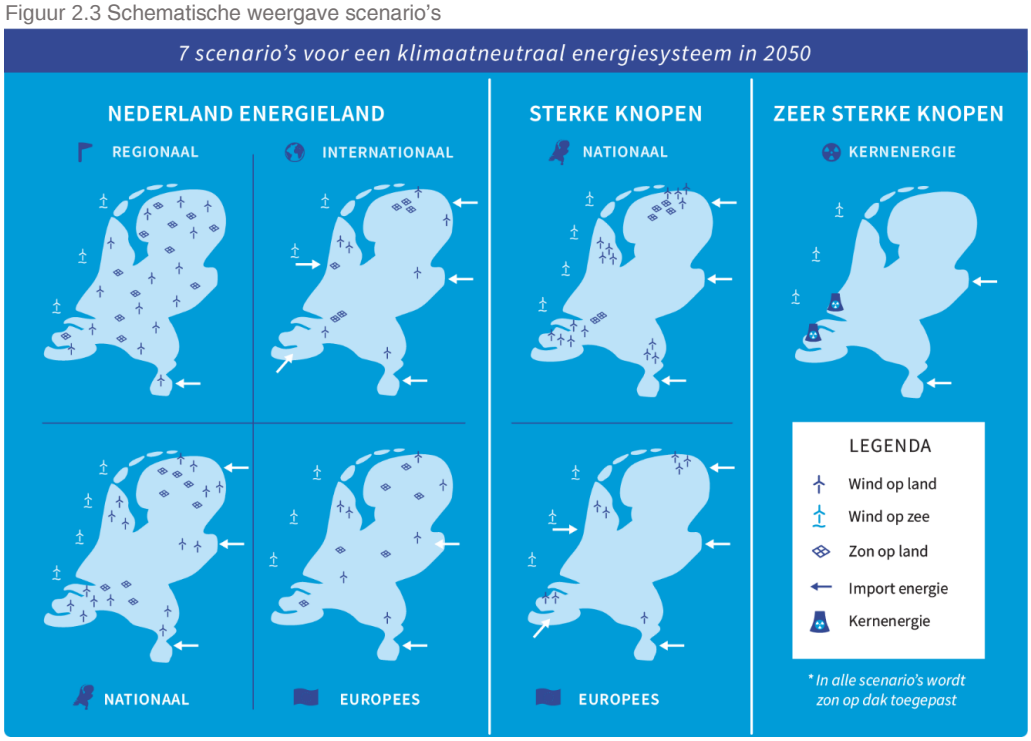
[15] Intussen zijn nieuwe investeringsplannen van de netbeheerders uitgebracht, het IP2022 (Gasunie, 2022; TenneT, 2022). Nieuwe projecten uit deze investeringsplannen zijn geen onderdeel van de uitgevoerde doorrekeningen. In Bijlage XV is het verschil tussen de investeringsplannen nader toegelicht. Daarbij is ook aangegeven of nieuwe investeringen uit IP2022 terugkomen in de analyses naar benodigde energie-infrastructuur richting 2050 in de IEA.

2.4 Beschrijving scenario's 2050

Zoals eerder besproken wordt in de IEA gebruikgemaakt van zeven scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050, die de hoekpunten van het speelveld voor 2050 omvatten. De scenario's zijn gebaseerd op de vier Klimaatneutrale scenario's die gebruikt zijn voor de integrale infrastructuurverkenning II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020)[16]. De scenario's heten Regionale Sturing, Nationale Sturing, Europese Sturing en Internationale Sturing. Deze vier scenario's zijn integraal overgenomen en heten de Nederland Energieland-scenario's. Daarnaast zijn drie scenario's toegevoegd, de Sterke Knopen en Zeer Sterke Knopen-scenario's. Hieronder volgt een omschrijving van de zeven gebruikte scenario's. Een uitgebreide omschrijving is te vinden in Bijlage IV. Figuur 2.3 geeft een schematische weergave van de zeven scenario's.

- Vier **Nederland Energieland-scenario's.** Deze scenario's verschillen van elkaar qua energetische invulling en omvatten daarvoor de hoeken van het speelveld. De ruimtelijke invulling varieert nauwelijks tussen deze scenario's. Bij de ruimtelijke invulling ligt de focus van deze scenario's op spreiding van de elementen van het energiesysteem.
- 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 van de elementen van het energiesysteem.
- Eén **Zeer Sterke Knopen-scenario** met kernenergie. Dit scenario is gebaseerd op een van de Sterke Knopen-scenario's, maar met kerncentrales in plaats van hernieuwbare opwek op land en gascentrales. Zowel de energetische invulling als de ruimtelijke invulling van dit scenario verschilt van de andere scenario's.

Figuur 2.3 Schematische weergave scenario's



[16] Ondertussen zijn nieuwe II3050-scenario's gepubliceerd, maar voor de IEA is nog gebruikgemaakt van de eerste versie van de II3050-scenario's. De impact van de nieuwe scenario's wordt besproken in paragraaf 2.8.

Elk scenario heeft een energetische en ruimtelijke invulling. Bij de energetische invulling van de scenario's is de totale energievraag en het totale energieaanbod voor heel Nederland bepaald, met uitsplitsing naar energiedrager en bron. Bij de ruimtelijke invulling is bepaald hoe deze energievraag en het energieaanbod ruimtelijk neerkomen. Elk scenario bestaat uit vier elementen (vraag, productie, opslag, infrastructuur) en meerdere onderdelen (het element opslag bestaat bijvoorbeeld uit de onderdelen opslag elektriciteit, opslag waterstof en opslag methaan). Voor elk onderdeel is in het scenario de energetische en ruimtelijke invulling bepaald.

Energetische invulling

Voor elk scenario is een inschatting gemaakt van de energetische invulling. Hiervoor zijn de volgende twee stappen doorlopen:

1. **Bepalen energetische invulling niet-regelbare productie en vraag.** Voor de scenario's Nederland Energieland en Sterke Knopen is dit direct gebaseerd op de Klimaatneutrale scenario's die gebruikt zijn voor de integrale infrastructuurverkenning II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020). Het scenario Zeer Sterke Knopen is gebaseerd op het scenario Sterke Knopen Europese Sturing. Daarbij worden alle windturbines op land (en een deel van de regelbare productie bij stap 2) vervangen door kern-centrales.
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 in balans zijn, voor elke energiedrager. Hiervoor is 'flex' nodig. Onder flex vallen regelbare centrales, opslag en import/export. Voor elk scenario is de energetische invulling van flex bepaald door middel van modellering van de netbeheerders. Zij hebben hiervoor een jaarrond-berekening uitgevoerd waarbij voor elk uur bepaald is hoeveel regelbare productie en opslag nodig is om vraag en aanbod te balanceren.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de kerncijfers van de scenario's, zowel van de niet-regelbare productie en vraag als van 'flex'.

Tabel 2.1 Overzicht van de kerncijfers van de scenario's

	Nederland Energieland				**Knopen**		
	1 Regionale Sturing	**2 Nationale Sturing**	**3 Europese Sturing**	**4 Internationale Sturing**	**5 Sterke Knopen Nationale Sturing**	**6 Sterke Knopen Europese Sturing**	**7 Zeer Sterke Knopen (kernenergie)**
Totale energievraag	1.181 PJ	1.319 PJ	1.647 PJ	1.735 PJ	1.319 PJ	1.647 PJ	1.647 PJ
Elektriciteitsvraag	690 PJ	764 PJ	863 PJ	847 PJ	764 PJ	863 PJ	863 PJ
Waterstofvraag (incl. non-energetisch, excl. synthetische brandstoffen)	121 PJ	266 PJ	421 PJ	494 PJ	266 PJ	421 PJ	421 PJ
Windenergie op zee (incl. energie voor synthetische brandstoffen)	43 GW	72 GW	42 GW	38 GW	72 GW	42 GW	42 GW
Wind op land	20 GW	20 GW	10 GW	10 GW	20 GW	10 GW	0 GW
Zon op dak	59 GW	49 GW	23 GW	18 GW	59 GW	58 GW	58 GW
Zon op veld	66 GW	57 GW	34 GW	34 GW	48 GW	0 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	18 GW

	Nederland Energieland				Knopen		
	1 Regionale Sturing	2 Nationale Sturing	3 Europese Sturing	4 Internationale Sturing	5 Sterke Knopen Nationale Sturing	6 Sterke Knopen Europese Sturing	7 Zeer Sterke Knopen (kernenergie)
Batterijen	54 GW	53 GW	33 GW	29 GW	33 GW	33 GW	27 GW
Opslag waterstof	36 TWh	37 TWh	10 TWh	47 TWh	37 TWh	10 TWh	12 TWh
Opslag methaan	24 TWh	14 TWh	55 TWh	15 TWh	14 TWh	55 TWh	45 TWh
Kerncentrales	0 GW	0 GW	0 GW	0 GW	0 GW	0 GW	8,3 GW
Grote centrales	15 GWe	17 GWe	17 GWe	16 GWe	17 GWe	17 GWe	12 GWe
Regelbare centrales	18 GWe	18 GWe	19 GWe	18 GWe	18 GWe	19 GWe	16 GWe
Interconnectiecapaciteit elektriciteit	15 GW	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	57 TWh
(Netto) import methaan	2 TWh	0 TWh	185 TWh	5 TWh	0 TWh	185 TWh	126 TWh

Ruimtelijke invulling

De ruimtelijke invulling van de Nederland Energieland-scenario's heeft spreiding als leidend ruimtelijk principe. Op basis van verschillende criteria is een inschatting gemaakt waar de energievraag in 2050 ruimtelijk neerslaat. De hernieuwbare opwek op land is in deze scenario's evenredig verdeeld over de beschikbare ruimte in heel Nederland en de aanlanding van windenergie op zee is verdeeld over zes aanlandingslocaties aan de kust volgens een vaste verdeling. De regelbare centrales, elektrolysers en opslag zijn vanuit netperspectief, op een zo optimaal mogelijke manier over Nederland verdeeld.

Bij de scenario's Sterke Knopen is clustering het leidende ruimtelijke principe. De opgave van hernieuwbare opwek op land na 2030 wordt geclusterd op enkele geschikte locaties en ook de regelbare centrales en elektrolysers zijn geclusterd op enkele geschikte locaties. Voor windenergie op zee zijn diepe aanlanding en een alternatieve verdeling over de aanlandingslocaties aan de kust meegenomen.
Het scenario Zeer Sterke Knopen is gelijk aan het scenario Sterke Knopen Europese Sturing, met uitzondering van wind op land, regelbare centrales en kernenergie. De kerncentrales in dit scenario worden geplaatst in Borssele/Sloegebied en op de Maasvlakte.

2.5 Benodigde energie-infrastructuur 2050

Voor elk van de zeven scenario's voor het energiesysteem in 2050 hebben de netbeheerders de impact op de energie-infrastructuur bepaald met een doorrekening op basis van hun netmodellen. Er zijn afzonderlijke netmodellen voor het hoogspanningsnet (van TenneT) en voor de gastransportnetten (van Gasunie). Voor warmte-infrastructuur en overige buisleidingen zijn aparte analyses gedaan.

In de netmodellen zijn alle onderdelen van de energie-infrastructuur opgenomen. Zo bevat het netmodel van het hoogspanningsnet alle hoogspanningsverbindingen en hoogspanningsstations[17]. De netmodellen bevatten de energie-infrastructuur zoals die er naar verwachting uitziet in 2030, zoals beschreven in de uitgangssituatie die beschreven is in paragraaf 2.3. Voor alle onderdelen van de energie-infrastructuur is de maximale belastbaarheid gespecificeerd[18].

[17] De velden die bij hoogspanningsstations nodig zijn om grote producenten of afnemers van elektriciteit aan te sluiten zijn niet meegenomen in het netmodel. Hier wordt een aparte analyse voor gedaan.

[18] De maximale belastbaarheid geeft aan hoeveel energie er op een bepaald moment getransporteerd kan worden door een onderdeel.

In de doorrekeningen met de netmodellen is bepaald hoeveel transport van energie nodig is zodat alle energie getransporteerd kan worden van productielocatie naar afnemer, op elk moment van het jaar. Voor elk uur van het jaar wordt daarmee de belasting op alle onderdelen bepaald door de gelijktijdige combinatie van vraag, aanbod en opslag. Er is sprake van een knelpunt als de maximale belasting in het jaar op een onderdeel groter is dan de maximale belastbaarheid, aangezien dan niet alle energie getransporteerd kan worden.

Uit de doorrekeningen van de netbeheerders volgt voor elk scenario een overzicht van de knelpunten in de energie-infrastructuur. Voor elk knelpunt is een oplossing noodzakelijk. Het is echter niet zo dat elke oplossing van knelpunten een (aanzienlijke) ruimtelijke impact heeft. Op basis van stelregels is een inschatting gemaakt van de meest waarschijnlijke oplossing voor elk knelpunt. Welke oplossing nodig is hangt af van de hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (aangeduid als Energy Not Transported (ENT)). Als dit een kleine hoeveelheid is, kan het knelpunt vaak opgelost worden met een operationele ingreep[19]. Als grote hoeveelheden energie niet getransporteerd kunnen worden is de aanleg van nieuwe energie-infrastructuur noodzakelijk, wat een ruimtelijke consequentie heeft. Deze knelpunten, de mogelijke oplossingen daarvoor en de gevolgen van die oplossingen zijn de focus van deze IEA.

Onzekerheid over benodigde energie-infrastructuur
In de analyses in deze IEA is op basis van stelregels een inschatting gemaakt van de benodigde energie-infrastructuur voor elk van de 2050-scenario's. Dit heeft als doel om in te kunnen schatten welke ruimte nodig is voor de ontwikkeling van de energiehoofdstructuur voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Het is daarmee niet bepaald dat al deze energie-infrastructuur en daarvoor benodigde ruimte richting 2050 uiteindelijk ontwikkeld en ingevuld gaat worden. Meer gedetailleerde analyses van netbeheerders zijn nodig om voor de individuele projecten te bepalen of en hoeveel nieuwe energie-infrastructuur uiteindelijk nodig is en of deze projecten opgenomen worden in hun investeringsplannen. De onzekerheid over benodigde energie-infrastructuur in de toekomst en de benodigde ruimte daarvoor wordt (gedeeltelijk) opgevangen door het cyclische karakter van het PEH.

Op basis van het overzicht van de knelpunten en de stelregels voor oplossingsrichtingen, in combinatie met de afzonderlijke analyses voor warmte-infrastructuur en overige buisleidingen, is voor elk scenario een inschatting gemaakt welke nieuwe energie-infrastructuur naar verwachting noodzakelijk is. Op basis hiervan zijn de robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes uitgewerkt.

2.6 Robuuste ontwikkelingen 2050

Voor elk scenario is bepaald hoeveel 'flex' (regelbare productie, opslag en import/export) en energie-infrastructuur noodzakelijk is voor een robuust energiesysteem. Bij de robuuste ontwikkelingen wordt bepaald welke ontwikkelingen (ontwikkeling van flex en/of nieuwe energie-infrastructuur) in ieder geval noodzakelijk zijn en waarvoor in ieder geval ruimte noodzakelijk is. Een uitgebreide omschrijving van de robuuste ontwikkelingen 2050 is te vinden in Bijlage VII.

Een ontwikkeling is robuust als deze in alle scenario's optreedt. Binnen de IEA zijn alleen ruimtelijke ingrepen relevant. Daarom is een ontwikkeling alleen robuust genoemd als er een grote kans is op een (aanzienlijke) ruimtelijke ingreep in alle scenario's. Naast de ruimte voor robuuste ontwikkelingen is uiteraard in 2050 nog veel meer (ruimte voor) nieuwe energie-infrastructuur nodig. Waar dit nodig is, hangt af van de keuzes die gemaakt worden (volgt in paragraaf 2.7).

[19] Bijvoorbeeld redispatch bij het hoogspanningsnet. Bij redispatch betaalt TenneT afnemers of producenten van elektriciteit om hun productie of afname te verminderen of juist toe te laten nemen zodat minder transport nodig is op een verbinding waar een knelpunt dreigt op te treden. Als er slechts op enkele momenten in het jaar knelpunten optreden op een bepaalde verbinding is dit goedkoper dan het aanleggen van nieuwe infrastructuur.

Tot 2030 vinden veel ontwikkelingen plaats bij alle soorten energie-infrastructuur. Zo worden veel uitbreidingen gedaan aan het 380kV-net, worden de 150kV- en 110kV-netten op een andere manier ingericht (met een pocketstructuur) en wordt een Nationaal Waterstofnetwerk aangelegd. Deze geplande investeringen lossen naar verwachting alle huidige problemen met netcongestie op. Aangezien de ontwikkelingen tot 2030 worden meenemen als uitgangssituatie, komen deze niet terug in de robuuste ontwikkelingen hieronder.

De belangrijkste robuuste ontwikkelingen richting 2050 zijn:

- Om de leveringszekerheid in het toekomstige klimaatneutrale energiesysteem te garanderen is een forse hoeveelheid regelbaar vermogen nodig. Deze regelbare centrales 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, toe van ongeveer 20 GW nu naar 33 tot 36 GW in 2050. Hiervoor moeten de huidige locaties omgebouwd worden naar centrales op waterstof of groengas. Daarom is op de huidige Barro-locaties ook in de toekomst ruimte nodig voor regelbare centrales.
- Om vraag en aanbod van elektriciteit te balanceren is opslag van elektriciteit met batterijen noodzakelijk (waarom dit met batterijen wordt opgelost is toegelicht in Bijlage VII Knelpuntenanalyse). Deze batterijen worden ingezet om kortetermijn-onbalans tussen vraag en aanbod van elektriciteit op te vangen en zijn nodig in elk scenario. Logische locaties voor deze batterijen zijn bij hoogspanningsstations en dan met name op locaties met veel hernieuwbare opwek, zoals aanlandingspunten van windenergie op zee of bij grootschalige hernieuwbare opwek op land (>100 MW).
- Elektrolysers hebben een systeemfunctie doordat ze overschotten van elektriciteit omzetten in waterstof. Vanuit deze functie kunnen elektrolysers geplaatst worden bij locaties waar veel overschotten van elektriciteit ontstaan (bij aanlandingspunten windenergie op zee of opweklocaties van wind of zon op land) of bij locaties waar veel vraag is naar waterstof (in industrieclusters). In beide gevallen zijn elektrolysers nodig in de Rotterdamse haven en bij Borssele/Sloegebied.
- Waterstofopslag is nodig om de onbalans tussen vraag en aanbod van waterstof gedurende het jaar op te vangen. Er zijn verschillende mogelijke locaties voor de opslag van waterstof, maar er is één locatie voor waterstofopslag die in alle scenario's terugkomt: de opslag in Zuidwending. De omvang van de opslag verschilt per scenario.
- Bij elk scenario zijn naar verwachting nieuwe 380kV-verbindingen nodig tussen Eindhoven en Maasbracht. Dit is al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022.
  De procedure voor de verzwaring van de verbinding Eindhoven–Maasbracht is al gestart en de procedure voor het nieuwe circuit wordt eind 2023 gestart. Ook is er bij elk scenario een nieuwe 380kV-verbinding nodig tussen Hengelo en Zwolle. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door beperkte modellering van de uitwisseling van elektriciteit met het buitenland. Verder onderzoek met gedetailleerdere modellering is nodig om te bepalen of hier echt een uitbreiding nodig is. Tot slot is een pocketstructuur nodig bij het 150kV-net in de Rotterdamse Haven en in de kop van Noord-Holland. Op deze locaties was de pocketstructuur nog niet meegenomen in het netmodel, aangezien het op het moment van het opstellen van het netmodel nog onduidelijk was hoe deze pockets eruit gaan zien. Op andere locaties in Nederland is de pocketstructuur wel al opgenomen in het netmodel.
- Bij elk scenario zijn naar verwachting uitbreidingen van bestaande 380kV-stations of ontwikkeling van nieuwe 380kV-stations nodig bij Dodewaard, Eindhoven, Graetheide, Simonshaven/omgeving, Beverwijk/Noordzeekanaalgebied, Borssele/Sloegebied, Eemshaven, Middenmeer (kop van Noord-Holland) en op de Maasvlakte. Daarnaast is een uitbreiding of ontwikkeling van een nieuw 220kV-station nodig bij Weiwerd. In sommige gevallen zijn nieuwe transformatoren nodig en in andere

gevallen nieuwe velden bij hoogspanningsstations om de capaciteit van de stations te vergroten en daarmee het direct aansluiten van grote afnemers of producenten mogelijk te maken. Bij Simonshaven/omgeving[20] en Borssele/ Sloegebied zijn deze uitbreidingen al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022. De aanleg van een nieuw 220kV-station bij Delfzijl/Weiwerd wordt al benoemd in het IP2022, maar is daarin nog niet opgenomen als project.

- In alle scenario's heeft het voorziene Nationaal Waterstofnetwerk naar verwachting voldoende capaciteit om alle waterstof te kunnen transporteren. Wel zijn nieuwe aansluitleidingen en/of aftakkingen naar het Nationaal Waterstofnetwerk nodig richting vraaglocaties, elektrolysers, waterstofcentrales of opslaglocaties. In elk scenario zijn nieuwe aansluitleidingen nodig bij Chemelot, Moerdijk, Bergen op Zoom, Delfzijl en het Noordzeekanaalgebied door de ontwikkeling van de vraag naar waterstof.
- Er zijn geen robuuste ontwikkelingen voor warmte-infrastructuur en overige buisleidingen. Er zijn naar verwachting wel nieuwe bovenregionale warmteleidingen en overige buisleidingen nodig, maar waar deze leidingen nodig zijn hangt af van keuzes die gemaakt worden (volgt in paragraaf 2.7).

2.7 Structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050

Naast de robuuste ontwikkelingen zijn er ook veel onzekerheden rondom de ontwikkeling van het energiesysteem richting 2050. Er zijn verschillende keuzes die gemaakt moeten worden, die in deze IEA structuurkeuzes zijn genoemd, en enkele ontwikkelingen die nog onzeker zijn, die in deze IEA systeemontwikkelingen zijn genoemd. Deze structuurkeuzes en systeemontwikkelingen hebben invloed op de ruimte die nodig is voor de energiehoofdstructuur en zijn daarmee relevant voor het Programma Energiehoofdstructuur. In de volgende subparagrafen worden structuurkeuzes en systeemontwikkelingen en de effecten op de benodigde energie-infrastructuur besproken; hierbij is binnen een structuurkeuze vaak sprake van twee mogelijke opties. Een uitgebreide uitwerking van de structuurkeuzes en systeemontwikkelingen staat in Bijlage VIII.

2.7.1 Structuurkeuze 1: Aanlanding van windenergie op zee aan de kust of diepe aanlanding

In de toekomst wordt een groot deel van de elektriciteit opgewekt door windparken op de Noordzee. Deze windstroom moet van de aanlandingslocaties naar de vraaglocaties getransporteerd worden. Dit heeft een grote impact op het hoogspanningsnet aangezien er veel elektriciteit van de kust naar het binnenland (en naar het buitenland) getransporteerd moet worden. Deze elektriciteit kan getransporteerd worden via het reguliere (bovengrondse) hoogspanningsnet, maar het kan ook via een directe ondergrondse HVDC[21]-verbinding naar een hoogspanningsstation in het binnenland. Dit heet diepe aanlanding. Bij deze structuurkeuze wordt aanlanding aan de kust vergeleken met diepe aanlanding. Er is gekeken naar diepe aanlanding in Maasbracht en bij Diemen. Diepe aanlanding wordt een mogelijkheid als gekozen wordt voor het elektrisch aanlanden van grote hoeveelheden windenergie op zee (ruim meer dan 30 GW).
Bij minder dan 30 GW elektrische aanlanding is optimalisatie van aanlanding aan de kust voldoende om te voorkomen dat forse uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk zijn (zie structuurkeuze 2 in paragraaf 2.7.2).

Bij de uitwerking van deze structuurkeuze is gekeken naar 52 GW elektrische aanlanding. Twee opties zijn met elkaar vergeleken:

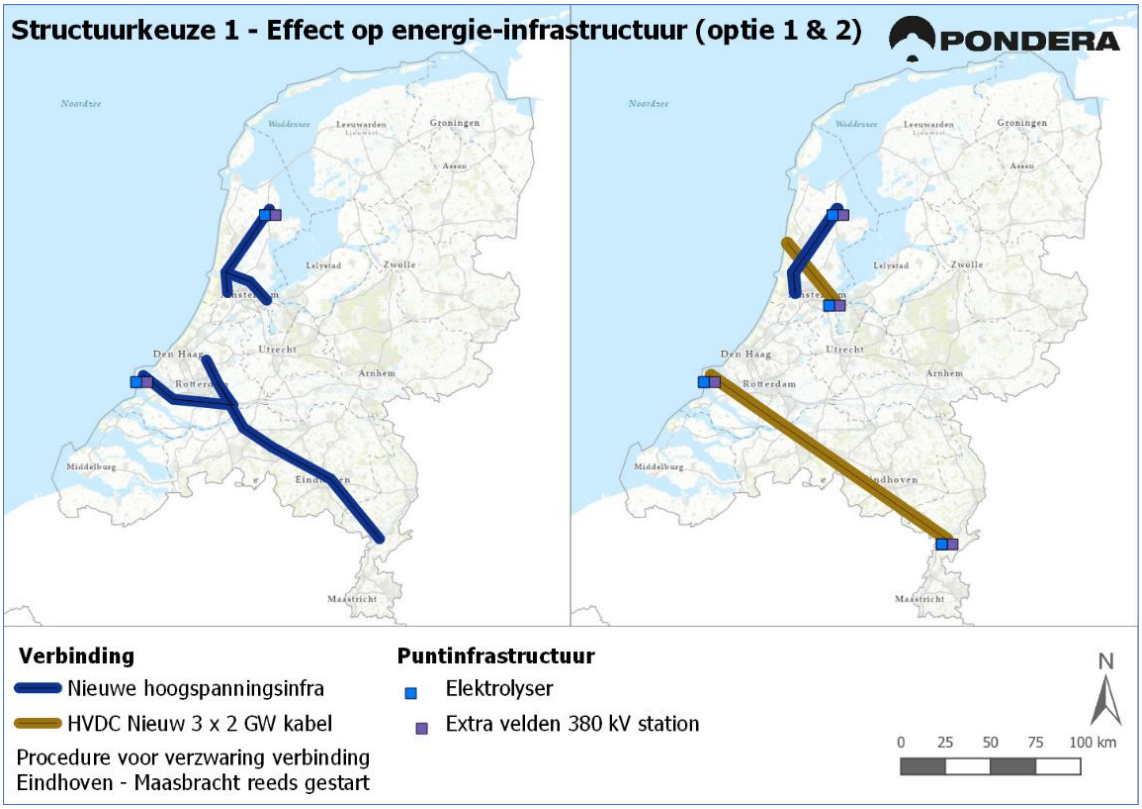
1. Alle elektriciteit landt aan bij de kust.

[20] Dit is een additionele uitbreiding ten opzichte van de uitbreiding die al opgenomen is in het IP2020 (zie Figuur 2.2).
[21] High Voltage Direct Current, oftewel een gelijkstroomhoogspanningsverbinding.

2. 6 GW windenergie landt aan bij zowel Diemen (in plaats van de kop van Noord-Holland) als bij Maasbracht (in plaats van de Maasvlakte).

Figuur 2.4 geeft een overzicht van de gevolgen van beide opties op de energie-infrastructuur.
Bij het aanlanden van alle elektriciteit aan de kust (optie 1) is nieuwe bovengrondse 380kV-infrastructuur nodig op meerdere plekken in Noord-Holland en tussen de Maasvlakte en Maasbracht. Bij diepe aanlanding (optie 2) zijn alleen in Noord-Holland nog enkele nieuwe bovengrondse 380kV-verbindingen nodig. Daarnaast zijn ondergrondse HVDC-kabels nodig. Bij aanlanding aan de kust is meer puntinfrastructuur (380kV-stations, converterstations, elektrolysers, batterijen) nodig op de aanlandingslocaties aan de kust. Bij diepe aanlanding is puntinfrastructuur nodig in Maasbracht en Diemen, maar zijn minder aanpassingen nodig bij de aanlandingslocaties aan de kust (Maasvlakte, kop van Noord-Holland).

Figuur 2.4 Structuurkeuze 1[22]



2.7.2 Structuurkeuze 2: Aanlanding windenergie op zee, geconcentreerd of gespreid aan de kust

Er zijn verschillende geschikte locaties aan de kust voor (elektrische) aanlanding van windenergie op zee. Het is de vraag hoeveel aanlanding van windenergie op zee op elk van deze locaties wenselijk is.
Een efficiënte verdeling van het vermogen aan windenergie op zee over de aanlandingslocaties, kan ervoor zorgen dat minder uitbreidingen aan hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk zijn. Bij deze structuurkeuze zijn twee mogelijke verdelingen vergeleken:

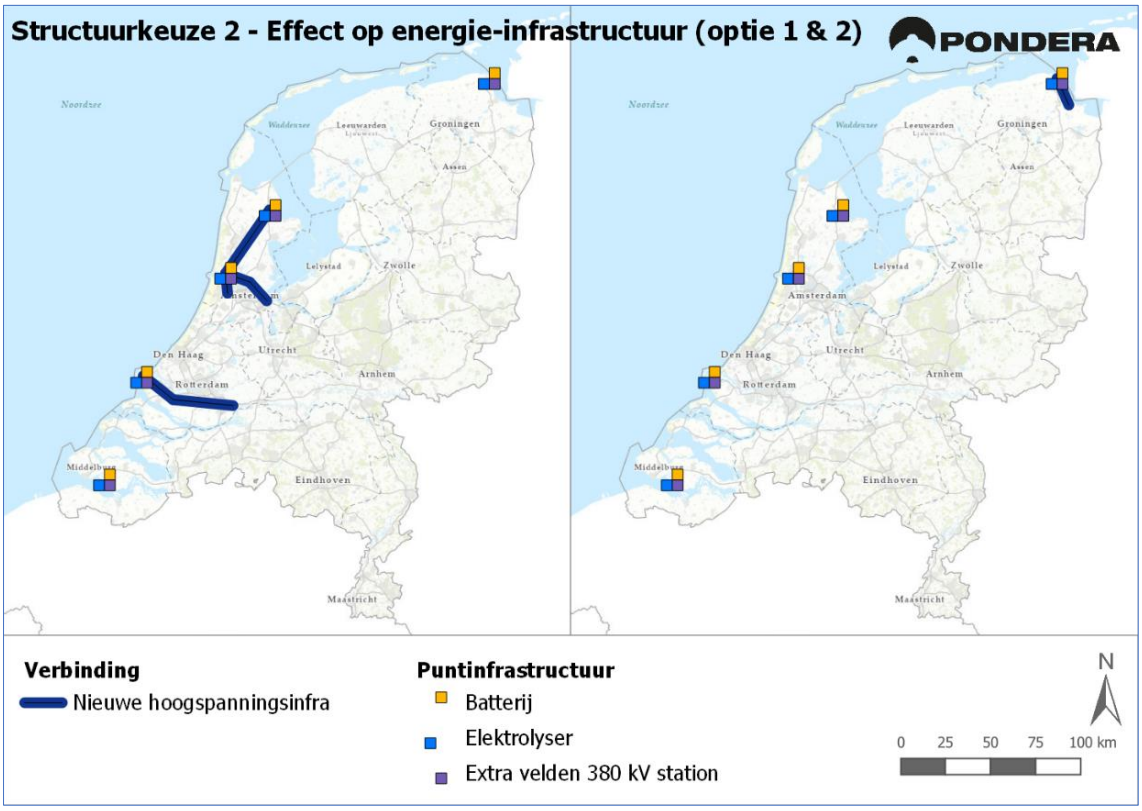
[22] De nieuwe 380kV-verbinding Eindhoven–Maasbracht bij optie 1 is ondertussen al opgenomen in het nieuwe Investeringsplan van TenneT, het IP2022.

1. Bij geconcentreerde aanlanding landt het grootste gedeelte van de windstroom aan in Noord- en Zuid-Holland, aangezien de elektriciteitsvraag daar het hoogst is.
2. Bij gespreide aanlanding wordt de beschikbare transportcapaciteit van het hoogspanningsnet meegenomen in de afweging en wordt de windstroom meer evenredig verdeeld over de aanlandingslocaties. Dit leidt tot meer aanlanding in Zeeland en Groningen dan bij de optie waar het grootste gedeelte van de windstroom aanlandt in Noord- en Zuid-Holland.

Bij deze structuurkeuze gekeken naar in totaal 30 GW elektrische aanlanding van windenergie op zee. Bij hogere vermogens elektrische aanlanding moet naar andere opties gekeken worden (zoals nog meer aanlanding op aanlandingslocaties aan de kust of diepe aanlanding). Bij deze structuurkeuze is naar de effecten op land gekeken, de effecten op zee vallen buiten de scope van PEH en daarmee van deze IEA.

Figuur 2.5 geeft een overzicht van de gevolgen van beide opties voor de benodigde energie-infrastructuur. Bij geconcentreerde aanlanding in Noord- en Zuid-Holland, zijn op meerdere tracés uitbreidingen van het 380kV-net nodig in Noord-Holland en in Zuid-Holland. Bij gespreide aanlanding, zijn nauwelijks nieuwe hoogspanningsverbindingen nodig. Bij geconcentreerde aanlanding komt een groot deel van de punt-infrastructuur in de kop van Noord-Holland en op de Maasvlakte terecht. Bij gespreide aanlanding wordt de puntinfrastructuur evenrediger gespreid over de aanlandingslocaties aan de kust, doordat de aanlanding van windenergie op zee ook meer evenredig gespreid is.

Figuur 2.5 Structuurkeuze 2



2.7.3 Structuurkeuze 3: Locaties hernieuwbare opwek op land na 2030

Tot 2030 worden de locaties van hernieuwbare opwek op land bepaald in de RES'en. Na 2030 is er voor sommige scenario's nog een aanzienlijke additionele opgave voor hernieuwbare opwek op land tot aan 2050. Waar deze hernieuwbare opwek terechtkomt en hoe dit bepaald gaat worden, is nog niet duidelijk. Daarom is er ook geen kaart opgenomen bij deze structuurkeuze. Bij deze structuurkeuze is gekeken naar verschillende manieren om deze extra opgave voor hernieuwbare opwek op land te plaatsen. Er zijn twee opties onderzocht voor de invulling van de extra opgave voor hernieuwbare opwek op land na 2030:

1. Bij de eerste optie wordt de opgave na 2030 verspreid over heel Nederland.
2. Bij de tweede optie wordt de opgave geclusterd op vijf geschikte locaties (kop van Noord-Holland, Zeeland, Noordoost Nederland, Flevoland en de Peel).

Uit de doorrekeningen van de netbeheerders valt lastig af te leiden of clustering van hernieuwbare opwek op land een positieve of negatieve impact heeft op het hoogspanningsnet. Dit is afhankelijk van de manier waarop de opwek aangesloten wordt. Bij clustering neemt de belasting op het hoogspanningsnet op de clusterlocaties flink toe ten opzichte van spreiding, maar als de hernieuwbare opwek direct aangesloten wordt op 380kV- of 220kV-stations, is hier waarschijnlijk geen nieuwe hoogspanningsinfrastructuur voor nodig. Bij clustering wordt de belasting op 150kV- en 110kV-netten buiten de clusters minder ten opzichte van spreiding. Naar verwachting worden hierdoor echter geen uitbreidingen van de hoogspanningsinfrastructuur voorkomen, ook omdat in het algemeen weinig knelpunten te zien zijn het 110kV- en 150kV-net.

2.7.4 Structuurkeuze 4: Locaties clusters van elektrolysers

De opwek van hernieuwbare elektriciteit neemt richting 2050 sterk toe. Gedurende het jaar zullen er momenten ontstaan waarbij het aanbod aan hernieuwbare elektriciteit groter is dan de vraag. Daarbij ontstaat voor een aantal sectoren, met name in de industrie, een vraag naar waterstof richting 2050. Deze vraag kan (deels) ingevuld worden met behulp van elektrolysers. Elektrolysers kunnen ingezet worden om water met behulp van overschotten aan elektriciteit om te zetten in waterstof. Deze structuurkeuze vergelijkt twee opties:

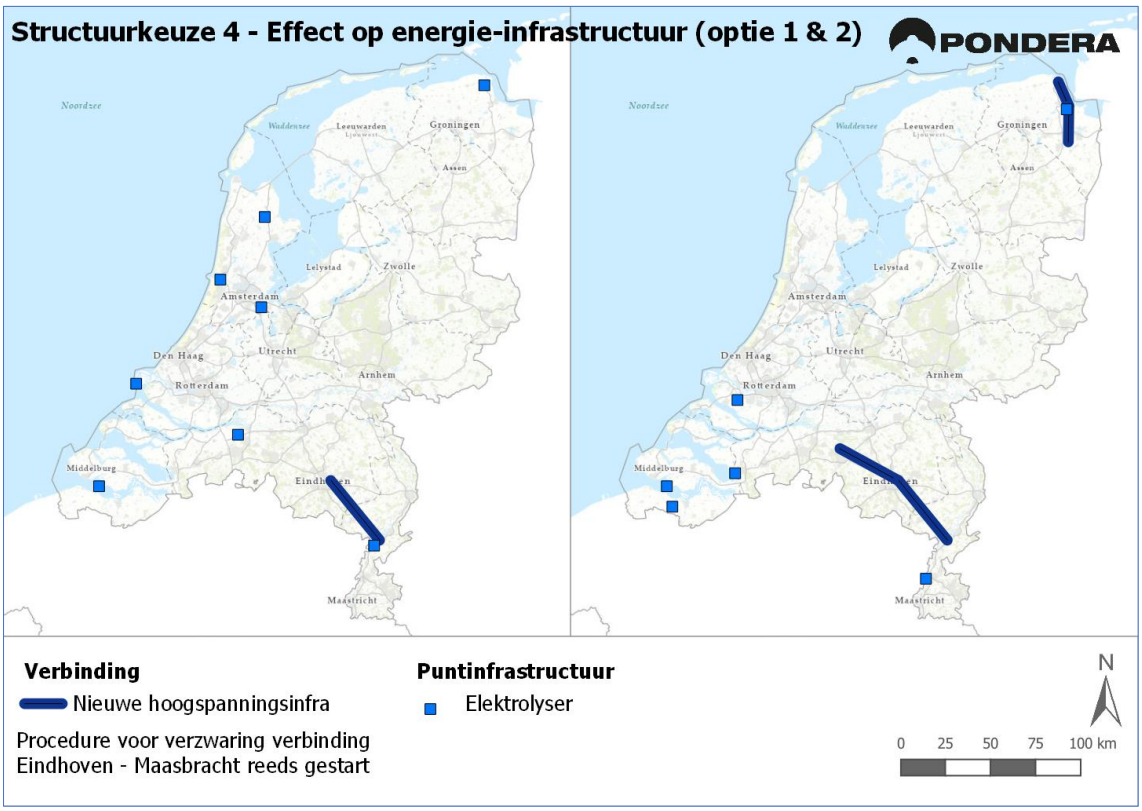
1. Clustering van elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee.
2. Clustering van elektrolysers bij grote industrieclusters.

Voor een efficiënt energiesysteem kan het nuttig zijn om elektrolysers te plaatsen op locaties waar op momenten veel elektriciteitsoverschot is, bijvoorbeeld bij aanlandingslocaties van windenergie op zee. Op deze manier worden de overschotten gelijk omgezet in waterstof en hoeven ze niet getransporteerd te worden via het hoogspanningsnet. Wel is transport van waterstof nodig van de aanlandingslocaties richting afnemers. Het kan daarom ook efficiënt zijn om de elektrolysers bij grote industriële afnemers van waterstof te plaatsen. In dat geval is er meer transport van elektriciteit nodig, maar is geen waterstoftransport noodzakelijk.

De keuze voor clustering bij aanlanding van windenergie op zee kent voordelen t.o.v. clustering bij grote industrieclusters. In een aantal gevallen is de aanlanding bij een industriecluster waardoor de verschillen wegvallen. In veel gevallen is bij de keuze voor elektriciteitstransport sprake van een grotere ruimtelijke impact omdat er nieuwe elektriciteitsinfrastructuur nodig is richting de elektrolysers en deze infrastructuur een forse bovengrondse ruimtelijke impact heeft.

Bij plaatsing van elektrolysers bij industrieclusters zijn op een paar trajecten nieuwe hoogspannings-verbindingen nodig. Het gaat om 380kV-verbindingen en is er uitbreiding van 220kV-verbindingen en circuits nodig. Bij de plaatsing van elektrolysers bij aanlandingslocaties is weinig nieuwe 380kV-infra-structuur nodig. Figuur 2.6 toont de benodigde nieuwe infrastructuur voor beide opties. In de waterstof-infrastructuur is weinig verschil zichtbaar tussen de twee opties, behalve één extra aansluitleiding die mogelijk vervangen moet worden voor een passende capaciteit bij clustering bij aanlanding van wind-energie op zee. Er is aanzienlijk minder nieuwe infrastructuur nodig bij de keuze voor clustering bij aanlanding van windenergie op zee.

Figuur 2.6 Structuurkeuze 4[23]



2.7.5 Structuurkeuze 5: Spreiding of clustering regelbare centrales

Richting 2050 neemt de vraag naar elektriciteit fors toe, terwijl de hernieuwbare opwek variabel is. Een groot deel van het jaar kan deze vraag ingevuld worden door productie van hernieuwbare bronnen (zon, wind), maar op de momenten dat het niet waait en de zon niet schijnt moet er ook voldoende geproduceerd worden om aan de vraag te voldoen. Daardoor is in 2050 fors meer regelbaar vermogen nodig in de vorm van regelbare centrales.

Er is tot 20 GW extra aan regelbare centrales nodig in 2050. Deze regelbare centrales kunnen op verschillende locaties terechtkomen. Bij deze structuurkeuze is gekeken naar verschillende manieren om deze regelbare centrales te plaatsen:

[23] De nieuwe 380kV-verbinding Eindhoven–Maasbracht bij beide opties is ondertussen al opgenomen in het nieuwe Investeringsplan van TenneT, het IP2022.

1. Verspreid over het land met veel kleine productie-eenheden.
2. Gecentraliseerd met enkele grote eenheden op de bestaande Barro-locaties.

In principe is spreiding van de regelbare centrales het meest gunstig voor de elektriciteitsinfrastructuur. Door spreiding kunnen de regelbare centrales zo dicht mogelijk bij de lokale tekorten aan elektriciteit geplaatst worden waardoor het transport van elektriciteit geminimaliseerd wordt. Bij clustering is er meer afstand tussen de productie en de vraag wat leidt tot meer transport. Uit de doorrekening van het hoogspanningsnet volgt echter dat voor het extra transport geen extra uitbreidingen van de hoogspanningsnetten nodig zijn. Er is hiervoor voldoende transportcapaciteit beschikbaar. Dit komt doordat het hoogspanningsnet in de toekomst grote hoeveelheden hernieuwbare productie van windenergie op zee en hernieuwbare opwek op land moet transporteren. Om deze overschotten af te voeren moet dusdanig veel transportcapaciteit aangelegd worden dat de regelbare opwek bij clustering geen extra knelpunten veroorzaakt.

Een grotere spreiding van regelbare centrales zorgt wel voor meer mogelijkheden voor redispatch[24] waardoor het makkelijker is voor TenneT om knelpunten op de hoogspanningsinfrastructuur operationeel op te lossen. Bij clustering van regelbare centrales is dit lastiger, wat tot hogere kosten voor redispatch of in het ergste geval tot afschakeling van belasting kan leiden.

De clustering van regelbare centrales leidt tot een aanzienlijke groei van het regelbare vermogen bij de industriële clusters. Om deze centrales aan te sluiten op het 380kV-net zijn extra velden en mogelijk nieuwe hoogspanningsstations nodig op de Barro-locaties. Bij spreiding van regelbare centrales is op een aanzienlijk aantal locaties uitbreiding van 150kV- en 110kV-stations nodig om de regelbare centrales aan te sluiten.

2.7.6 Structuurkeuze 6: Waterstofopslag in zoutcavernes of lege gasvelden

Om op alle momenten in het jaar in de vraag naar energie te voorzien is seizoensopslag nodig. Het gaat daarbij om grote volumes zodat alleen ondergrondse opslag geschikt is. In 2050 kan opslag van waterstof in de ondergrond mogelijk als seizoensopslag dienen. In deze structuurkeuze zijn twee opties vergeleken:
1. Opslag van waterstof in zoutcavernes.
2. Opslag van waterstof in gasbergingen en lege gasvelden[25].

Bij opslag van waterstof in zoutcavernes gaat het om meerdere clusters van elk vijf à zes zoutcavernes in Noord-Nederland. Deze keuze is logisch bij een relatief kleine opslagvraag (tot aan 10 TWh). Een voordeel van waterstofopslag in zoutcavernes is de inzet voor zowel seizoensopslag als voor handelen op energiemarkten. Bij de opslag in gasbergingen en lege gasbergingen gaat het om één à twee lege gasvelden/gasbergingen in Noord-Holland en/of Zuid-Holland, en de huidige opslag in Norg. Deze keuze is logisch bij een grote opslagvraag. De huidige gasbergingen worden ingezet voor seizoensopslag, maar er is nog onvoldoende kennis over de technische haalbaarheid van opslag van waterstof in deze bergingen of lege gasvelden. Een overweging van deze keuze vraagt een vroegtijdig onderzoek, waarbij – afhankelijk van de onderzoeksresultaten – realisatie op lange termijn eventueel mogelijk zou zijn.

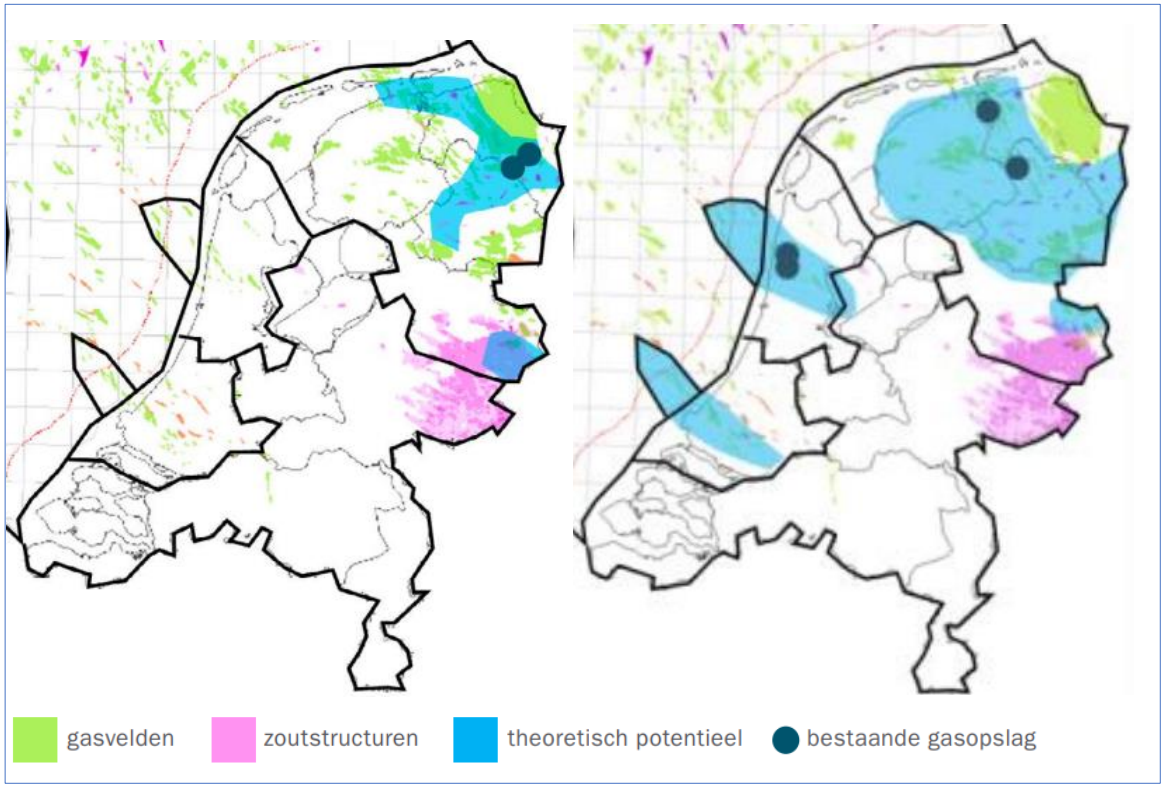
[24] Bij redispatch betaalt TenneT afnemers of producenten van elektriciteit om hun productie of afname te verminderen of juist toe te laten nemen zodat minder transport nodig is op een hoogspanningsverbinding waar een knelpunt dreigt op te treden. Als er slechts op enkele momenten in het jaar knelpunten optreden op een bepaalde verbinding is dit goedkoper dan het aanleggen van nieuwe infrastructuur.

[25] Met name voor waterstofopslag in gasbergingen en lege gasvelden zijn nog veel onderzoeksvragen onbeantwoord.

Voor opslag in zoutcavernes moeten zoutcavernes nog aangelegd worden. Hiervoor is nieuwe infrastructuur nodig voor zoutwinning en waterstoftransport van en naar cavernes tot het Nationaal Waterstofnetwerk. Voor lege gasvelden/gasbergingen is infrastructuur aanwezig, maar mogelijk moet deze aangepast worden.

Waterstofopslag in zoutcavernes heeft momenteel als voordeel dat meer bekend is over technische mogelijkheden, en dat spreiding van locaties spreiding van risico's geeft. Nadelen van opslag in zoutcavernes zijn de ruimtelijke impact, en de milieu-impact van zoutwinning. Waterstofopslag in lege gasvelden heeft als voordeel hergebruik van bestaande infrastructuur, nadeel is onzekerheid over kwaliteit/zuiverheid van waterstof en veiligheid.

Figuur 2.7 Zoutstructuren (links) en gasvelden (rechts) potentieel voor gasopslag (TNO & EBN, 2021)[26]



2.7.7 Structuurkeuze 7: Toepassing van kernenergie

Kernenergie kan in 2050 een significant onderdeel uitmaken van de energiemix. Bij deze structuurkeuze is gekeken naar de plaatsing van kerncentrales in Borssele/Sloegebied en op de Maasvlakte. Hiervoor is een nieuw scenario toegevoegd met kernenergie in plaats van wind op land (inclusief bestaande windturbines) en een deel van de gascentrales (optie 2)[27]. Dit is het scenario Zeer Sterke Knopen, dat gebaseerd is op het scenario Europese Sturing. Er zijn twee opties in beeld gebracht om de effecten van kernenergie in beeld te brengen:

1. Het scenario Europese Sturing zonder kernenergie en met wind op land en meer gascentrales (optie 1).

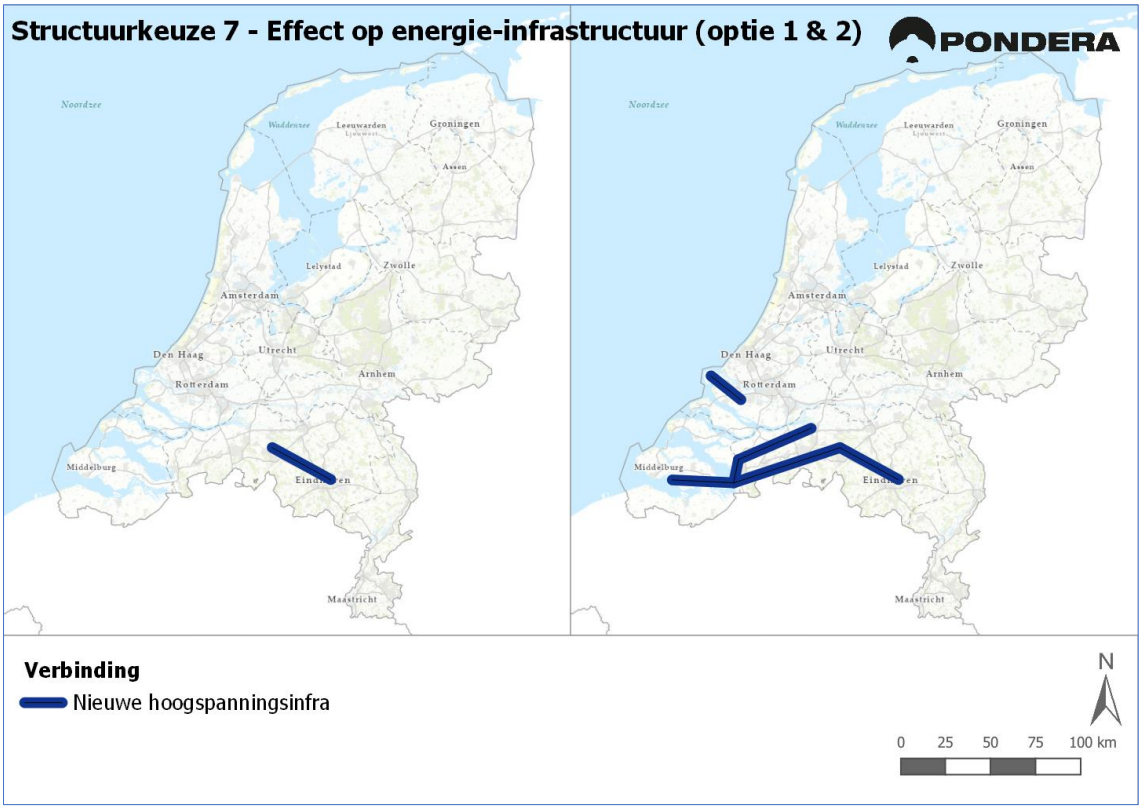
[26] Ondergrondse energieopslag in Nederland 2030-2050, (2021) TNO-EBN.
[27] Ook met kerncentrales is achtervang nodig met regelbare gascentrales, voor momenten met weinig wind en zon.

2. Het scenario Zeer Sterke Knopen waarbij kerncentrales worden geplaatst op de waarborgingslocaties uit het Barro, dit zijn Borssele/Sloegebied en de Maasvlakte. In deze gebieden is naar verwachting theoretisch ruimte voor vijf kerncentrales in totaal, met een gezamenlijk vermogen van 8,3 GW. De kerncentrales worden must-run[28] ingezet, aangezien uit analyses is gebleken dat dit economisch de meest gunstige inzet is. Dit betekent dat kerncentrales niet kunnen worden ingezet als regelbare productie voor momenten met weinig wind en zon, maar dat deze altijd draaien.

Door de inzet van kernenergie is minder opslag van elektriciteit, in de vorm van batterijen, nodig. Dit komt doordat de productie van kernenergie stabiel is en daarmee een kleinere opslagbehoefte van energie ontstaat.

De volgende figuur geeft een overzicht van de effecten op de energie-infrastructuur van de optie zonder kernenergie (optie 1) en de optie met kernenergie (optie 2).

Figuur 2.8 Analyse knelpunten Structuurkeuze 7



Het figuur laat zien dat de belasting op de 380kV-verbindingen op enkele punten toeneemt bij toepassing van 8,3 GW kernenergie, waardoor hier nieuwe infrastructuur noodzakelijk is:

1. **Van de Maasvlakte tot Crayestein**. Dit komt door de combinatie van vollastproductie van 3,3 GW kerncentrales op de Maasvlakte samen met aanlanding van 7,5 GW windenergie op zee.
2. **Vanaf Zeeland richting Oost-Brabant**. Dit komt ook door combinatie van vollastproductie van 5,0 GW kerncentrales in Borssele/Sloegebied samen met 7,5 GW aanlanding van windenergie op zee.

[28] Dit betekent dat de kerncentrales het hele jaar door draaien. Het alternatief is dat ze alleen aangezet worden op momenten dat ze nodig zijn, dan worden ze ingezet in de meritorder.

Beide knelpunten ontstaan door de combinatie van kerncentrales met aanlanding van windenergie op zee waarbij forse regionale overschotten van elektriciteit gedurende lange periodes in het jaar afgevoerd moeten worden richting de rest van Nederland en het buitenland. De huidige capaciteit van de 380kV-verbindingen is onvoldoende om dusdanig grote hoeveelheden elektriciteit af te voeren.

Doordat kernenergie in de plaats komt van windturbines op land zijn bij de optie met kernenergie minder uitbreidingen van regionale netten nodig. Windturbines op land worden normaal gesproken aangesloten op de koppelstations tussen het hoogspanningsnet en de regionale netten. Daarom zijn bij de optie zonder kernenergie ongeveer 5% meer nieuwe koppelpunten nodig. Daarnaast zijn er bij de optie zonder kernenergie kabels nodig die de windturbines verbinden met de koppelstations. Dit is bij de optie met kernenergie niet nodig.

2.7.8 Structuurkeuze 8: Binnenlandse productie synthetische brandstoffen of import

In 2050 is er een grote behoefte aan synthetische brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart. Nederland kan ervoor kiezen om deze brandstoffen zelf te produceren of om ze te importeren. Voor een constante toevoer van elektriciteit, waterstof en CO_2 is verbinding nodig met opslag- en back-up-voorzieningen. Deze structuurkeuze onderzoekt het effect op de nationale energie-infrastructuur van de volgende opties:

1. Alle synthetische brandstoffen worden geïmporteerd.
2. Een deel van de synthetische brandstoffen worden binnenlands geproduceerd, de rest geïmporteerd.

Binnenlandse productie van synthetische brandstoffen is op basis van groene waterstof en CO_2 geproduceerd met elektriciteit uit speciaal hiervoor geïnstalleerde extra windenergie op zee. De extra elektriciteit uit windenergie op zee wordt in deze optie voor 80% ingezet voor offshore waterstofproductie. Deze waterstof landt aan in de Eemshaven en in Den Helder/Middenmeer. Van de extra elektriciteit uit windenergie op zee wordt 20% ingezet voor de productie van CO_2 uit de lucht via Direct Air Capture (DAC). Dat gebeurt op land. Bij volledige import (optie 1) wordt de volledige vraag naar kerosine in Rotterdam (eenderde) en in Amsterdam (tweederde) geïmporteerd. Bij binnenlandse productie (optie 2) wordt een deel van de totale vraag naar kerosine nog steeds geïmporteerd, aangezien het niet mogelijk is om de volledige vraag met eigen productie in te vullen.

Bij beide opties zijn importterminals noodzakelijk bij de importlocaties Rotterdam en Amsterdam. Doordat bij optie 2 een deel van de vraag naar synthetische brandstoffen ingevuld wordt met binnenlandse productie zijn bij die optie minder grote importterminals noodzakelijk.

Om bij binnenlandse productie (optie 2) de additionele elektriciteitsvraag voor Direct Air Capture in te vullen, landt extra windenergie op zee aan bij de Maasvlakte en de Eemshaven, op beide locaties ongeveer 1,5 GW. Hiervoor zijn op deze locaties extra converterstations en nieuwe velden bij 380kV-stations nodig. Door deze extra aanlanding moet meer elektriciteit afgevoerd worden en wordt de belasting op het hoogspanningsnet groter. De omvang hiervan wordt maximaal 0,8 GW voor beide locaties; dit is beperkt ten opzichte van het totale vermogen windenergie op zee dat aanlandt op de Maasvlakte (12 GW) en Eemshaven (9 GW). Productie van synthetische brandstoffen vergroot knelpunten in Rotterdam en de Eemshaven op beperkte schaal: op beide aanlandingslocaties is een extra veld op een 380kV-station nodig om de windstroom aan te sluiten op het hoogspanningsnet.

Voor de aanlanding van waterstof bij de Eemshaven en Den Helder/Middenmeer bij binnenlandse productie zijn een gasmeetinstallatie en een waterstofleiding richting (een aftakking van) het Nationaal Waterstofnetwerk noodzakelijk. Bij beide locaties landt ongeveer 6,5 GW waterstof aan. De impact op de rest van de waterstofinfrastructuur is beperkt, en er zijn geen ruimtelijke reserveringen nodig. Wel neemt met de continue lokale productie van synthetische brandstoffen de vraag naar waterstofopslag toe. Daarnaast zijn extra regelbare centrales en extra elektrolysers nodig door de ongelijktijdigheid van de additionele elektriciteitsvraag en de additionele elektriciteitsproductie voor de synthetische brandstoffen.

2.7.9 Structuurkeuze 9: Faciliteren doorvoer grondstoffen naar buitenland

Nederland importeert veel grondstoffen en energie om deze weer door te voeren naar het buitenland, met name Duitsland en België. Door de energie- en grondstoffentransitie vindt er een verschuiving plaats in welke stoffen nodig zijn, maar het buitenland blijft behoefte hebben aan import. Nederland kan kiezen om dit wel, niet of gedeeltelijk te faciliteren. Deze keuze onderzoekt het effect op de nationale infrastructuur van:

1. Alleen import van brand- en grondstoffen voor binnenlands gebruik.
2. Additionele import van brand- en voor doorvoer naar het buitenland.

De extra stoffen worden geïmporteerd en doorgevoerd naar het Duitse Ruhrgebied (evt. via Chemelot) en de regio Antwerpen. Concreet gaat het om de export van waterstof, ammoniak, methanol, synthetische kerosine, lpg en propeen naar Duitsland, en de import van CO_2 vanuit het Ruhrgebied en Antwerpen.

De voornaamste consequentie van de keuze om te importeren voor doorvoer is de aanleg van negen nieuwe buisleidingen[29]. Daarnaast zijn er extra importterminals nodig en een exportterminal voor CO_2. De buisleidingen worden ondergronds aangelegd in bestaande leidingstroken. Er is op nog voldoende ruimte in de leidingstroken, al zijn er wel lokale knelpunten bij bepaalde tunnels, bruggen en de grens-overgang bij Duitsland.

2.7.10 Structuurkeuze 10: Geothermie of restwarmte?

Om bestaande warmtenetten te verduurzamen en toekomstige duurzame warmtenetten te realiseren, is er behoefte aan duurzame warmtebronnen. Geothermie en restwarmte zijn kansrijke warmtebronnen om op grote schaal warmte te produceren en over grote afstanden te transporteren. Overige warmtebronnen, zoals aquathermie of groengasketels, zullen naar verwachting vooral bij lokale warmtenetten ingezet worden en zijn voor de nationale energie-infrastructuur daarom niet van belang.

Geothermie en restwarmte zijn alleen niet overal aanwezig. Daarom is bovenregionaal warmtetransport nodig. Bovenregionaal warmtetransport verbindt grote productielocaties van duurzame warmte met grote stedelijke gebieden. Deze structuurkeuze kent twee opties:

1. Bovenregionaal warmtetransport met geothermie als hoofdbron.
2. Bovenregionaal warmtetransport met restwarmte als hoofdbron.

Beide bronnen kunnen ingezet worden als basislast, en bij een voldoende omvang van de warmtevraag zouden ze ook naast elkaar ingezet kunnen worden. Om een vergelijking te kunnen maken worden ze hier afzonderlijk beschouwd. Voor een toekomstige beschikbaarheid van restwarmte blijft industriële activiteit

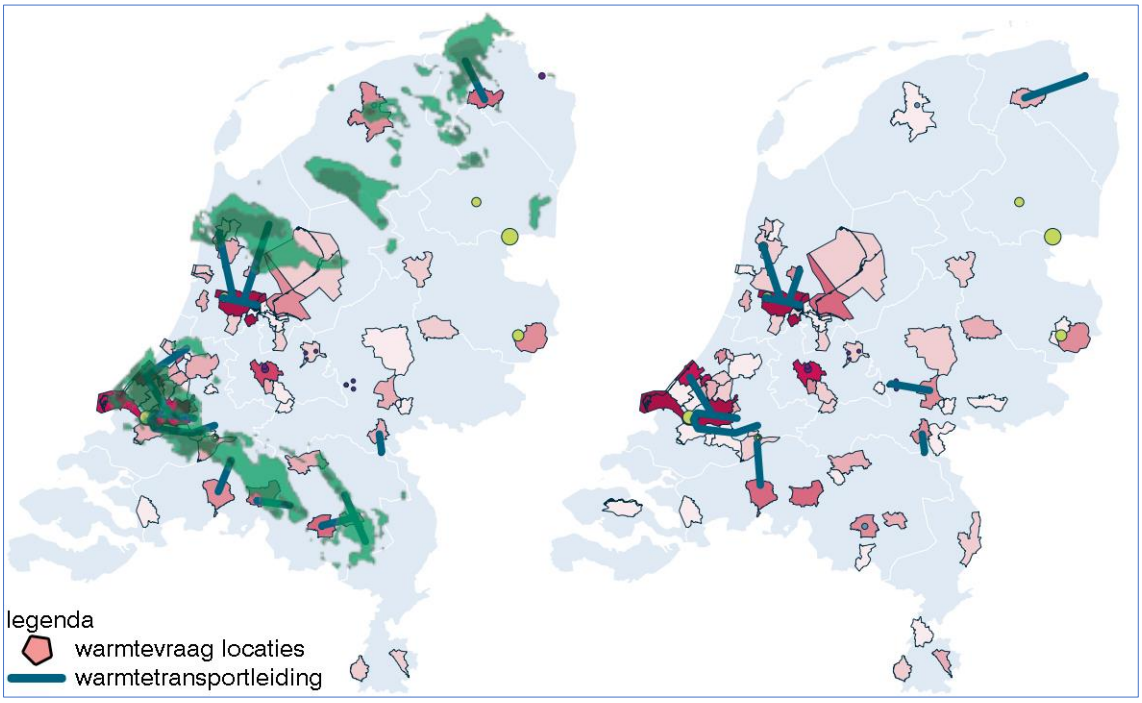
[29] Vier leidingen binnen Delta Rhine Corridor, vier leidingen naar het Ruhrgebied en één CO_2-leiding vanuit Antwerpen/Zeeland. Op basis van verwachting vanuit de markt en vanuit een groeiprognose van CE Delft.

nodig in grote industrie- en havenclusters. Voor een toekomstige beschikbaarheid van geothermie is de lokale ontwikkeling van geothermiebronnen van belang. Wanneer meer geothermie beschikbaar komt dan lokaal gebruikt wordt, is het mogelijk om die warmte te transporteren.

De locaties van de transportleidingen overlappen voor een deel tussen beide opties, maar de afstanden verschillen. Onderdeel zijn WarmtelinQ in Zuid-Holland, de uitbreiding van warmtenet Amsterdam, transportleidingen bij Nijmegen, Arnhem, Breda en Groningen. Dit zijn potentiële kansrijke locaties voor een bovenregionaal warmtetransport.

De volgende Figuur 2.9 geeft weer hoe grootschalig warmtetransport eruitziet wanneer de focus gelegd wordt op restwarmte (links) en geothermie (rechts). Veel van de stedelijke gebieden zijn in beide situaties dezelfde (regio Amsterdam, regio Rotterdam, regio Breda-Tilburg-Eindhoven, Arnhem-Nijmegen en Groningen) en ook de hoeveelheden getransporteerde warmte zijn vergelijkbaar. De verschillen zitten in de warmteproductielocaties en de ligging van de transportleidingen (blauwe lijnen). De keuze tussen restwarmte of geothermie onderzoekt dus het ruimtelijk effect van de ligging van de warmtetransport-leidingen.

Figuur 2.9 Grootschalig warmtetransport focus) restwarmte (rechts) en geothermie (links)



Bron: II3050 (versie 2020).

Naast de structuurkeuzes die gemaakt kunnen worden in het energiesysteem zijn er ook drie systeem-ontwikkelingen die uitgewerkt. Deze systeemontwikkelingen verschillen ten opzichte van de structuur-keuzes doordat dit geen zaken zijn waar een keuze gemaakt kan worden. De drie systeemontwikkelingen worden hieronder uitgewerkt. Een uitgebreide omschrijving van de uitwerking van de systeemontwikkeling is te vinden in Bijlage VIII.

2.7.11 Systeemontwikkeling 1: Maximale elektrificatie

Deze systeemontwikkeling kijkt naar de situatie waar ingezet wordt op maximale elektrificatie. Om aan de extra elektriciteitsvraag bij maximale elektrificatie te voldoen, is extra elektriciteitsproductie noodzakelijk. Deze productie kan ingevuld worden met extra windturbines en zonnepanelen, maar ook met extra inzet van regelbare centrales.

In beide gevallen zijn naar verwachting extra regelbare centrales nodig om in de hogere piekvraag te voorzien. De overige effecten van maximale elektrificatie zijn afhankelijk van de keuze hoe de extra elektriciteitsvraag ingevuld wordt en van de locatiekeuzes voor de additionele productie. De additionele productie kan ingevuld worden met extra hernieuwbare opwek of met regelbare centrales.
De kans op gevolgen voor de elektriciteitsinfrastructuur is moeilijk in te schatten, aangezien dit afhankelijk is van de specifieke invulling van de extra elektriciteitsvraag. Als er gekozen wordt om opwek niet zo dicht mogelijk bij de vraag te plaatsen, is het aannemelijk dat er nieuwe verbindingen nodig zullen zijn.
Als vraag en aanbod wel bij elkaar geplaatst worden, kan dit er zelfs toe leiden dat knelpunten op de hoogspanningsinfrastructuur verlicht worden.

2.7.12 Systeemontwikkeling 2: Maximaal gebruik waterstof

Deze systeemontwikkeling kijkt naar de situatie waar ingezet wordt op maximaal gebruik van waterstof. Maximaal gebruik van waterstof is waarschijnlijk bij een grote vraag vanuit de industrie. Een ontwikkeling naar maximaal gebruik van waterstof heeft mogelijk consequenties voor de energie-infrastructuur. In welke mate deze gevolgen optreden, is afhankelijk van waar de waterstof geproduceerd wordt.

Waterstof kan in Nederland op land of op zee geproduceerd worden, maar kan ook geïmporteerd worden. Bij een grote toename aan import zijn mogelijk importterminals nodig. Bij binnenlandse productie is er een toename in elektrolysers. Bij productie op land kan extra aanlanding van windenergie op zee zorgen voor extra ruimtebeslag door benodigde uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur.

Door een maximaal gebruik van waterstof kunnen er ook knelpunten ontstaan in de waterstofinfrastructuur. Gevolgen voor de infrastructuur ontstaan dan met name bij aansluitleidingen bij aanlandingslocaties; bij aansluitleidingen vanaf elektrolysers en door aftakkingen van het Nationaal Waterstofnetwerk naar afnemers.

2.7.13 Systeemontwikkeling 3: Maximaal gebruik groengas/methaan

Deze systeemontwikkeling omschrijft de situatie waarbij naast gebruik van waterstof, ingezet wordt op maximaal gebruik van groengas/methaan. Dat betekent dat het huidige methaannetwerk deels in stand wordt gehouden voor groengas en deels voor waterstof.

De gevolgen voor de infrastructuur hangen samen met de omvang en vorm van de vraag. Bij een groei van de industrie kan het zijn dat een aantal aansluitleidingen onvoldoende capaciteit heeft. Deze moeten dan mogelijk vervangen worden. Daarnaast kan er een situatie ontstaan waarbij zowel methaan als waterstof ingezet worden (bijvoorbeeld in de industrie). Hier zijn dan twee aansluitleidingen nodig, waar er nu meestal één aanwezig is.

Productie in Nederland op basis van in Nederland beschikbare biomassareststromen is onvoldoende om in de vraag te voorzien. Deze productie heeft mogelijk impact op regionale leidingen, maar er ontstaan

waarschijnlijk geen knelpunten op de hoofdinfrastructuur. Groengas kan geïmporteerd worden. Mogelijk kan dit via bestaande lng-terminals op de Maasvlakte en in de Eemshaven.

2.8 Verschillen- en gevoeligheidsanalyse

Nieuwe ontwikkelingen en beleidsplannen in de energietransitie volgen elkaar in snel tempo op. Deze ontwikkelingen en beleidsplannen zijn zo goed mogelijk meegenomen in de gebruikte scenario's en daarmee in dit onderzoek. Op een bepaald moment zijn de scenario's vastgelegd om berekeningen en nadere analyses te kunnen uitvoeren. Hierdoor zijn de meest recente relevante ontwikkelingen en beleidsplannen niet meegenomen in de scenario's.

Om deze wel een plek te geven in dit onderzoek is allereerst een verschillenanalyse uitgevoerd. In deze verschillenanalyse is gekeken of de belangrijkste nieuwe ontwikkelingen en beleidsplannen, zoals VAWOZ en de CES, binnen de bandbreedte van de gebruikte scenario's voor 2050 passen. Als dit niet het geval is, en het de verwachting is dat een bepaalde ontwikkeling een forse impact kan hebben op (de benodigde ruimte voor) het energiesysteem, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In deze gevoeligheidsanalyse wordt een inschatting gemaakt van de effecten van de nieuwe ontwikkelingen of beleidsplannen. Een uitgebreide omschrijving van de verschillen- en gevoeligheidsanalyse is te vinden in Bijlage XV. Bij de verschillenanalyse is gekeken naar de volgende beleidstrajecten/ontwikkelingen:

- Verkenning Aanlanding Wind Op Zee (VAWOZ) 2030;
- Voorverkenning VAWOZ 2040;
- Regionale Energie Strategie (RES) 1.0;
- Cluster Energie Strategieën (CES) 2.0;
- Verhoging doelstelling CO_2-reductie 2030;
- Meerjarenprogramma Infrastructuur En Klimaat (MIEK)-projecten;
- Routekaart elektrificatie industrie;
- Vollasturen hernieuwbare opwek;
- Nieuwe scenario's II3050;
- Extra reserveringen Gasunie;
- Target Grid.

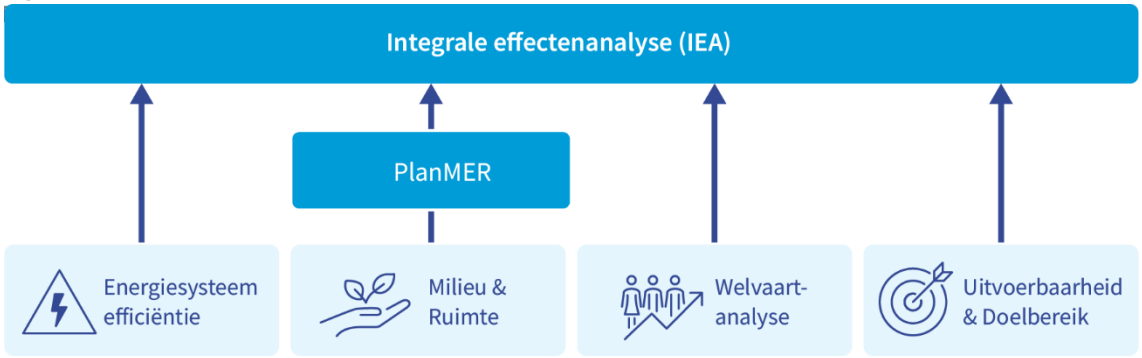
Een deel van de mogelijke ontwikkelingen uit de Voorverkenning VAWOZ 2040, CES 2.0, MIEK-projecten, vollasturen hernieuwbare opwek, nieuwe scenario's II3050 en extra reserveringen Gasunie vallen buiten de bandbreedte van de scenario's die gebruikt zijn voor de IEA. Daarom is voor die beleidstrajecten een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, de resultaten hiervan staan in paragraaf 5.5.

3 Beoordelingssystematiek

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat de omschrijving van de beoordelingskaders van de verschillende thema's binnen de IEA: Systeemefficiëntie, Milieu & Ruimte, Welvaartsanalyse en tenslotte Uitvoerbaarheid & Doelbereik. Het detailniveau van de beoordelingskaders past bij het (abstracte) nationale schaalniveau van het Programma Energiehoofdstructuur.

Figuur 3.1 De vier thema's binnen de IEA



3.2 Systeemefficiëntie

In het toekomstige energiesysteem speelt het afstemmen van vraag en aanbod en opslag van energie een belangrijke rol in de efficiëntie van het energiesysteem. Een uitgebreide toelichting op de methodiek is te vinden in Bijlage IX. Dit thema is alleen toegepast voor de structuurkeuzes[30], aangezien het effect op systeemefficiëntie een relevante afweging is voor de keuzes die gemaakt kunnen worden. Systeemefficiëntie is niet uitgewerkt voor de robuuste ontwikkelingen, aangezien deze naar verwachting in ieder geval nodig zijn en daar geen keuze gemaakt kan worden.

Het gaat bij systeemefficiëntie om het zo goed mogelijk afstemmen van vraag en aanbod van energie, zowel in tijd, hoedanigheid (energiedrager) als in de ruimte, het zo efficiënt mogelijk omgaan met energie en de robuustheid van het energiesysteem. Hierbij zijn diverse vormen van energie beschouwd: elektriciteit, waterstof, methaan en voor zover relevant ook warmte.

In de beoordeling systeemefficiëntie is naar vier beoordelingscriteria gekeken, dit zijn:

- **Benodigde hoeveelheid opslag en conversie.** Er is flexibiliteit in het energiesysteem nodig om vraag en aanbod van energie in de tijd met elkaar af te stemmen. Het toekomstige energieaanbod in de vorm van elektriciteit is grilliger dan dat van vandaag en daardoor groeit de behoefte naar flexibiliteit. Deze flexibiliteit kan geleverd worden door energieopslag, conversie, interconnectie en vraagsturing. Het verschilt per energiebron hoeveel flexibiliteit nodig is, uitgaande van een gegeven vraag. Voor de beoordeling van dit criterium is voor de structuurkeuzes bepaald hoeveel opslag en conversie noodzakelijk zijn om vraag en aanbod op elk moment in het jaar te matchen.

[30] Er is geen beoordeling systeemefficiëntie gedaan voor de systeemontwikkelingen, aangezien er onvoldoende data beschikbaar is voor een beoordeling van deze ontwikkelingen.

- **Benodigde hoeveelheid nieuwe energie-infrastructuur.** Energie moet vanaf de productielocaties naar de vraaglocaties getransporteerd worden. Hier is energie-infrastructuur voor nodig. Voor de beoordeling van dit criterium zijn de effecten van de structuurkeuzes op de benodigde hoeveelheid nieuwe energie-infrastructuur bepaald. Hiervoor is het van belang of aanbod en vraag dicht bij elkaar geplaatst worden waardoor minder transport van energie en minder energie-infrastructuur noodzakelijk zijn Daarnaast is de bestaande energie-infrastructuur van belang, aangezien niet overal in Nederland evenveel transportcapaciteit aanwezig is.
- **Energieverliezen.** Bij conversie, opslag en transport van energie vinden energieverliezen plaats. Hierdoor is er in totaal meer energieproductie noodzakelijk om aan een bepaalde vraag te voldoen. Dit is meegewogen in dit criterium.
- **Leveringszekerheid.** Onder leveringszekerheid wordt verstaan de mate waarin afnemers verzekerd zijn van levering van energie op elk moment in het jaar[31]. Er is een kwalitatieve beschouwing gedaan van het effect van de opties van structuurkeuzes op de robuustheid van het energiesysteem en de leveringszekerheid in het geval van calamiteiten.

Er is geen absolute beoordeling van de structuurkeuzes op het gebied van systeemefficiëntie gedaan, aangezien de meeste structuurkeuzes alleen betrekking hebben op een klein deel van het energiesysteem en het daardoor lastig is om in absolute zin iets over de systeemefficiëntie te zeggen. Daarom zijn de effecten op de systeemefficiëntie van het totale energiesysteem van de twee opties met elkaar vergeleken. De twee opties zijn ten opzichte van elkaar beoordeeld, het gaat dus om de relatieve effecten. Dit gebeurt voor elk van de vier beoordelingscriteria. Er volgt geen totaalbeoordeling van de vier criteria aangezien het niet mogelijk is om de verschillende beoordelingscriteria tegen elkaar af te wegen en op te tellen.
De volgende tabel geeft een overzicht van de mogelijke beoordelingen:

Optie 1	Optie 2	Toelichting
		Optie 1 scoort licht beter dan optie 2
		Optie 2 scoort licht beter dan optie 1
		Optie 1 scoort significant beter dan optie 2
		Optie 2 scoort significant beter dan optie 1
		Er is geen verschil tussen beide opties

Er is, voor zover mogelijk, een kwantitatieve onderbouwing van de beoordeling gegeven. Als dit niet mogelijk is, worden de effecten kwalitatief besproken en wordt de beoordeling gebaseerd op expert judgement.

3.3 Milieu & Ruimte

3.3.1 Inleiding

In deze paragraaf staat de toelichting op de ruimtelijke uitgangspunten en op de beoordelingssystematiek van het thema Milieu & Ruimte. De technische uitwerking van robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes (zie hoofdstuk 2) zijn de basis voor de beoordeling van Milieu & Ruimte. De beoordeling van Milieu & Ruimte is – alleen indien sprake is van ruimtebeslag van de ontwikkelingen – van toepassing op zowel de robuuste knelpunten als structuurkeuzes. Voor het beoordelen van de potentiële effecten is een aantal ruimtelijke uitgangspunten gehanteerd (zie paragraaf 3.3.2). In paragraaf 3.3.3 staat de toelichting van het beoordelingskader met verschillende beoordeelde aspecten. Vanuit de Commissie m.e.r. en andere

[31] Er is niet gekeken naar de voorzieningszekerheid. Onder voorzieningszekerheid valt of er ook op de lange termijn voldoende energie beschikbaar is in Nederland.

trajecten is een aantal aandachtspunten meegegeven voor het beoordelingskader, deze zijn opgenomen in paragraaf 1.2 van Bijlage X. Dit is de bijlage waarin de beoordelingssystematiek van Milieu & Ruimte in meer detail is uitgewerkt.

Disclaimer Milieu & Ruimte
Voor de effectbeoordeling van Milieu & Ruimte zijn in deze IEA onderbouwde aannames gedaan over ruimtebeslag, potentiële locaties en ruimtelijke tracéopties van verschillende elementen en onderdelen van het energiesysteem. Dit is gedaan om de belangrijkste effecten te beoordelen en op basis hiervan ontwikkelrichtingen voor de energiehoofdstructuur te kunnen opnemen in het PEH. Het is niet bedoeld om exacte locaties en/of tracés te kiezen, dit gebeurt in planologische (vervolg)procedures voor een specifiek(e) locatie of tracé. Voorafgaand aan deze procedures wordt eerst een investeringsbeslissing genomen door een netbeheerder* of andere (private) initiatiefnemer. In de planologische procedures vindt in samenspraak met de omgeving nader (lees meer gedetailleerd) onderzoek plaats naar verschillende opties en effecten aan de hand van de op dat moment meest recente informatie. Op basis hiervan wordt een beslissing genomen over een precieze ligging van een tracé of locatie. Dit kan onder meer betekenen dat informatie uit deze IEA door de tijd of door andere keuzes in de planologische procedure achterhaald is en/of aangevuld dient te worden. De bevindingen van de IEA/PEH worden wel meegenomen in deze procedures; het PEH is één van de kaders voor de uitwerking in deze vervolgprocedures.

*De netbeheerders maken hierbij een afweging voor de beste nettechnische oplossing.

3.3.2 Uitgangspunten Milieu & Ruimte

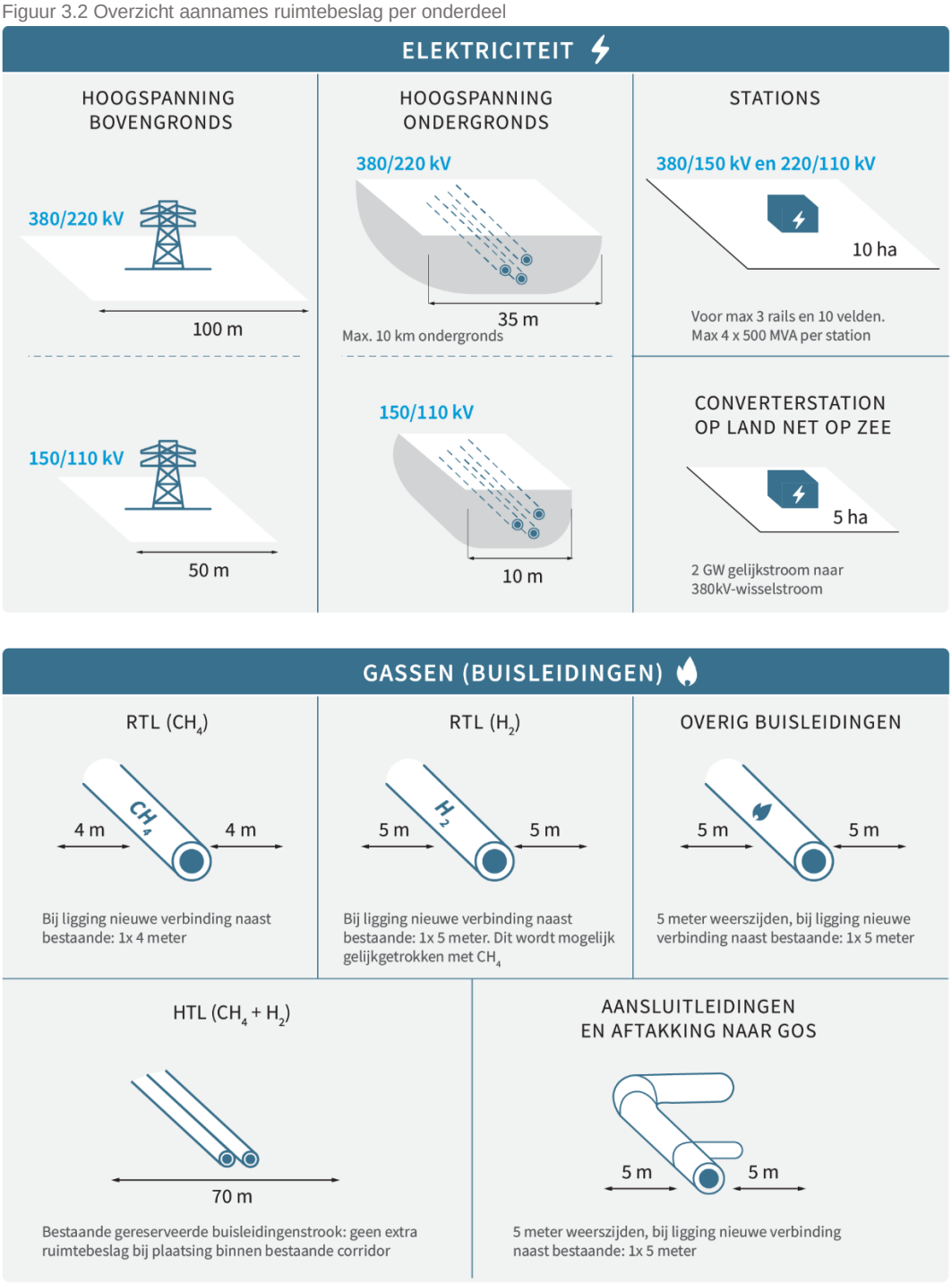
De uitgangspunten voor de beoordeling van Milieu & Ruimte zijn onderverdeeld in uitgangspunten voor het ruimtebeslag van elementen en onderdelen van het energiesysteem en traceringsuitgangspunten die gevolgd zijn bij het formuleren van nieuwe verbindingen.

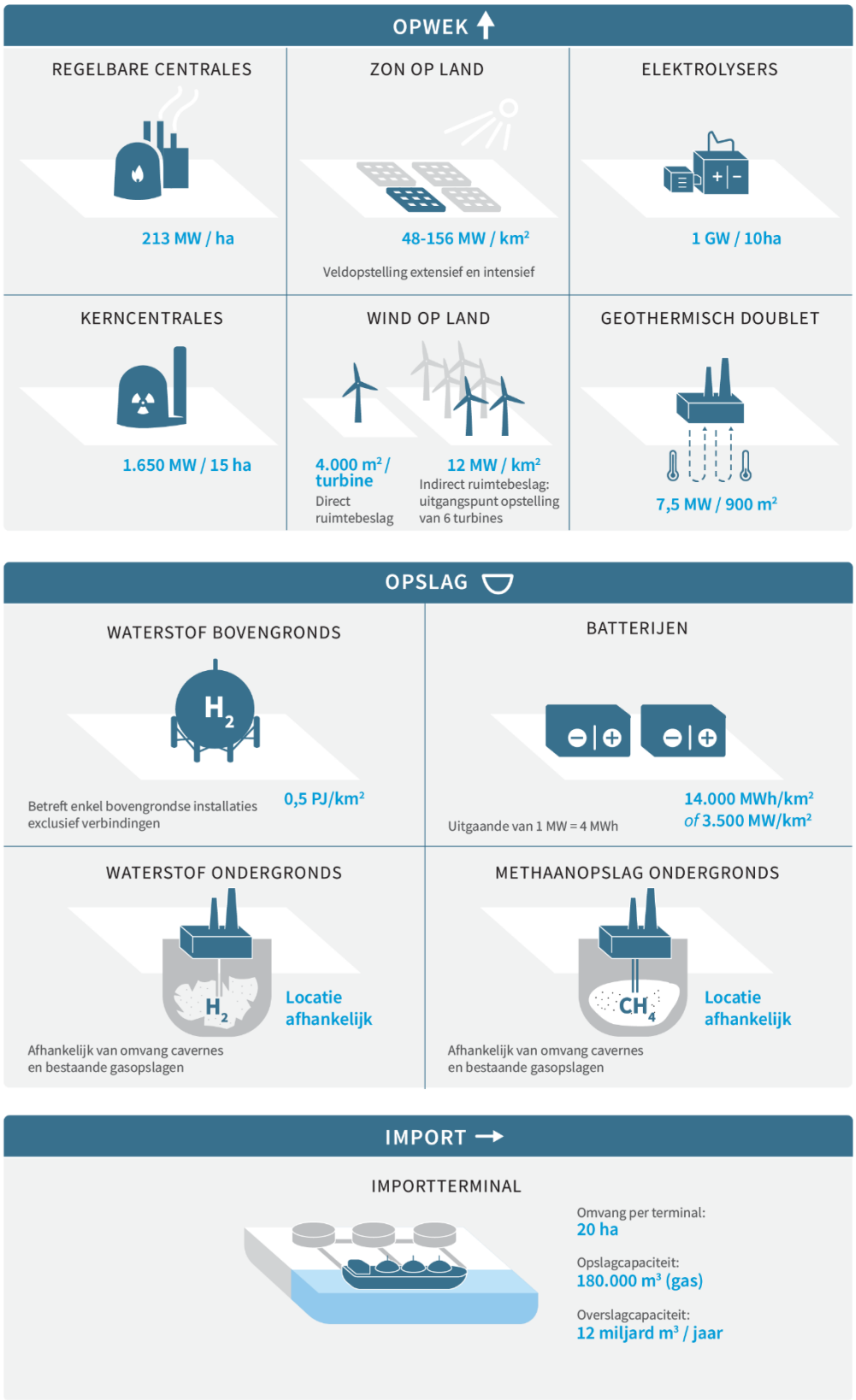
Uitgangspunten ruimtebeslag

Figuur 3.2 geeft een overzicht van de uitgangspunten van het ruimtebeslag[32] bij de verschillende onderdelen in het energiesysteem.

[32] Bij enkele onderdelen wordt er onderscheid gemaakt in direct en indirect ruimtebeslag. Bij indirect ruimtebeslag is medegebruik van de ruimte voor bepaalde functies mogelijk.

Figuur 3.2 Overzicht aannames ruimtebeslag per onderdeel




OPWEK
REGELBARE CENTRALES
213 MW / ha
ZON OP LAND
48-156 MW / km²
Veldopstelling extensief en intensief
ELEKTROLYSERS
1 GW / 10ha
KERNCENTRALES
1.650 MW / 15 ha
WIND OP LAND
4.000 m² / turbine
Direct ruimtebeslag
12 MW / km²
Indirect ruimtebeslag: uitgangspunt opstelling van 6 turbines
GEOTHERMISCH DOUBLET
7,5 MW / 900 m²
OPSLAG
WATERSTOF BOVENGRONDS
Betreft enkel bovengrondse installaties exclusief verbindingen
0,5 PJ/km²
BATTERIJEN
Uitgaande van 1 MW = 4 MWh
14.000 MWh/km²
of 3.500 MW/km²
WATERSTOF ONDERGRONDS
Locatie afhankelijk
Afhankelijk van omvang cavernes en bestaande gasopslagen
METHAANOPSLAG ONDERGRONDS
Locatie afhankelijk
Afhankelijk van omvang cavernes en bestaande gasopslagen
IMPORT
IMPORTTERMINAL
Omvang per terminal:
20 ha
Opslagcapaciteit:
180.000 m³ (gas)
Overslagcapaciteit:
12 miljard m³ / jaar

Traceringsuitgangspunten

Als naar verwachting een nieuwe 220/380kV-verbinding nodig is, zijn meerdere tracéopties nader onderzocht. Een tracéoptie is een mogelijk tracé voor een nieuwe verbinding die is ontwikkeld aan de hand van traceringsuitgangspunten (zie hieronder). Vanuit efficiënt ruimtegebruik is parallelligging van een nieuwe verbinding met een bestaande verbinding gewenst. Door parallelligging zijn de te verwachten effecten op Milieu & Ruimte lager dan bij een nieuwe tracéroute. Er kan bijvoorbeeld efficiënter met de ruimte worden omgegaan, vanuit landschap is er geen nieuwe doorsnijding en het aanvaringsrisico voor vogels neemt niet of minder toe. Om deze reden is er altijd een tracéoptie ontwikkeld die parallel ligt met de bestaande verbinding. Het kan zijn dat door ruimtelijke belemmeringen een dergelijk tracé niet haalbaar is. Daarom zijn er, indien ruimtelijk mogelijk, één of twee alternatieve tracéopties onderzocht die minder of geen parallelligging hebben met de bestaande verbinding. Om de ruimtelijke en milieueffecten te kunnen bepalen zijn deze tracéopties bekeken in een zone. Het doel is mogelijke effecten en risico's op het gebied van Milieu & Ruimte in beeld te brengen, niet om een voorkeurstracé te bepalen.

Het traceren van de niet-parallelle tracéopties gebeurt aan de hand van principes uit de NOVI die aangevuld zijn met uitgangspunten die in de praktijk worden gebruikt voor nieuwe verbindingen.

Praktisch leidt dit tot de volgende 'traceringsuitgangspunten':

- De nieuwe verbinding is zo kort mogelijk.
- Er wordt zo veel als mogelijk gebundeld met bestaande infrastructuur (breder dan hoogspanning alleen).
- Woonkernen worden zo veel als mogelijk vermeden.
- Beschermde natuurgebieden worden zo veel als mogelijk vermeden.

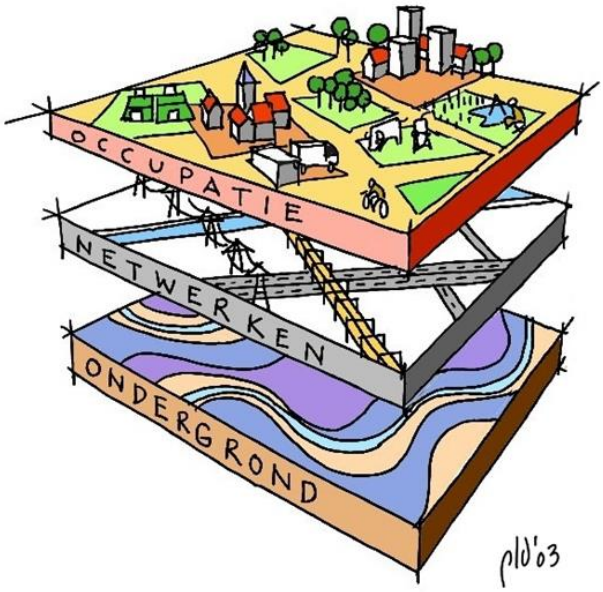
Uitgangspunt is dat hoogspanningsverbindingen van 220kV en 380kV bovengronds worden aangelegd.

3.3.3 Beoordelingskader

Lagenbenadering en milieuaspecten

Voor het thema Milieu & Ruimte is gebruikgemaakt van de lagenbenadering uit de ruimtelijke ordening. De lagenbenadering kent een indeling in drie lagen: 'occupatielaag', 'netwerklaag' en 'ondergrondlaag' (zie Figuur 3.3). De occupatielaag geeft de menselijke activiteiten weer zoals wonen, werken en recreëren (ruimtelijke inrichting). De netwerklaag bestaat uit zichtbare en onzichtbare (infra)structuren (ruimtelijke structuur). De ondergrondlaag bevat de fysieke ondergrond, het water- en natuursysteem (ruimtelijk systeem). De verschillende te onderzoeken milieuaspecten zijn ondergebracht in de verschillende lagen.

Figuur 3.3 De drie lagen in de lagenbenadering (Ruimte met Toekomst, 2022)



In Tabel 3.1 is de onderverdeling per laag te zien met milieuaspecten, deelaspecten en criteria.
De (deel)aspecten zijn ruimtelijke of milieuonderdelen van een laag, zoals het aspect infrastructuur en het deelaspect waterkeringen in de netwerklaag. Het effect op de (deel)aspecten wordt aan de hand van de criteria bepaald.

Tabel 3.1 Onderdelen, aspecten en criteria per laag

Aspect	Deelaspecten	Criteria
Occupatielaag		
Leefomgeving, ruimtegebruik, gebruiksfuncties en veiligheid	Bebouwing	Mate van aanwezigheid woonkernen/woningen
	Landbouw	Mate van gevoeligheid landbouwgebied
	Externe veiligheid	Mate van invloed op aanwezige risicobronnen
	Recreatie	Mate van aanwezigheid recreatief gebied
Toekomstige ontwikkelingen	Toekomstige ontwikkelingen	Mate van samenhang met toekomstige ontwikkelingen
Netwerklaag		
Infrastructuur	Rijks-, Spoor-, Waterwegen	Mate van aanwezigheid rijks-, spoor- en water-wegen, inclusief transport gevaarlijke stoffen
	Waterkeringen	Mate van aanwezigheid (complexe) waterkeringen
	Bestaande Hoogspannings- en buisleidingen	Mate van aanwezigheid hoogspanning en buisleidingen
	Ruimtebeslag PEH	Mate van beschikbaarheid benodigde ruimte
Natuur	NNN	Mate van aanwezigheid NNN
Ondergrondlaag		
Bodem & Water	Bodem	Mate van aanwezigheid gevoelige bodems
	Grondwater	Mate van aanwezigheid grondwaterbeschermings-gebied
	Overstromingsgevoeligheid	Mate van aanwezigheid overstromingsgevoelig gebied

Aspect	Deelaspecten	Criteria
Natuur	Natura 2000-gebieden, beschermde provinciale gebieden	Mate van aanwezigheid beschermde gebieden
Landschap, cultuurhistorie en archeologie	Landschap	Mate van samenhang met bestaand landschap
	Cultuurhistorie	Mate van aanwezigheid waardevolle gebieden
	Archeologie	Mate van aanwezigheid archeologische waarden

Beoordeling in drie categorieën

Bij de beoordeling van Milieu & Ruimte is de volgende aanpak gevolgd:

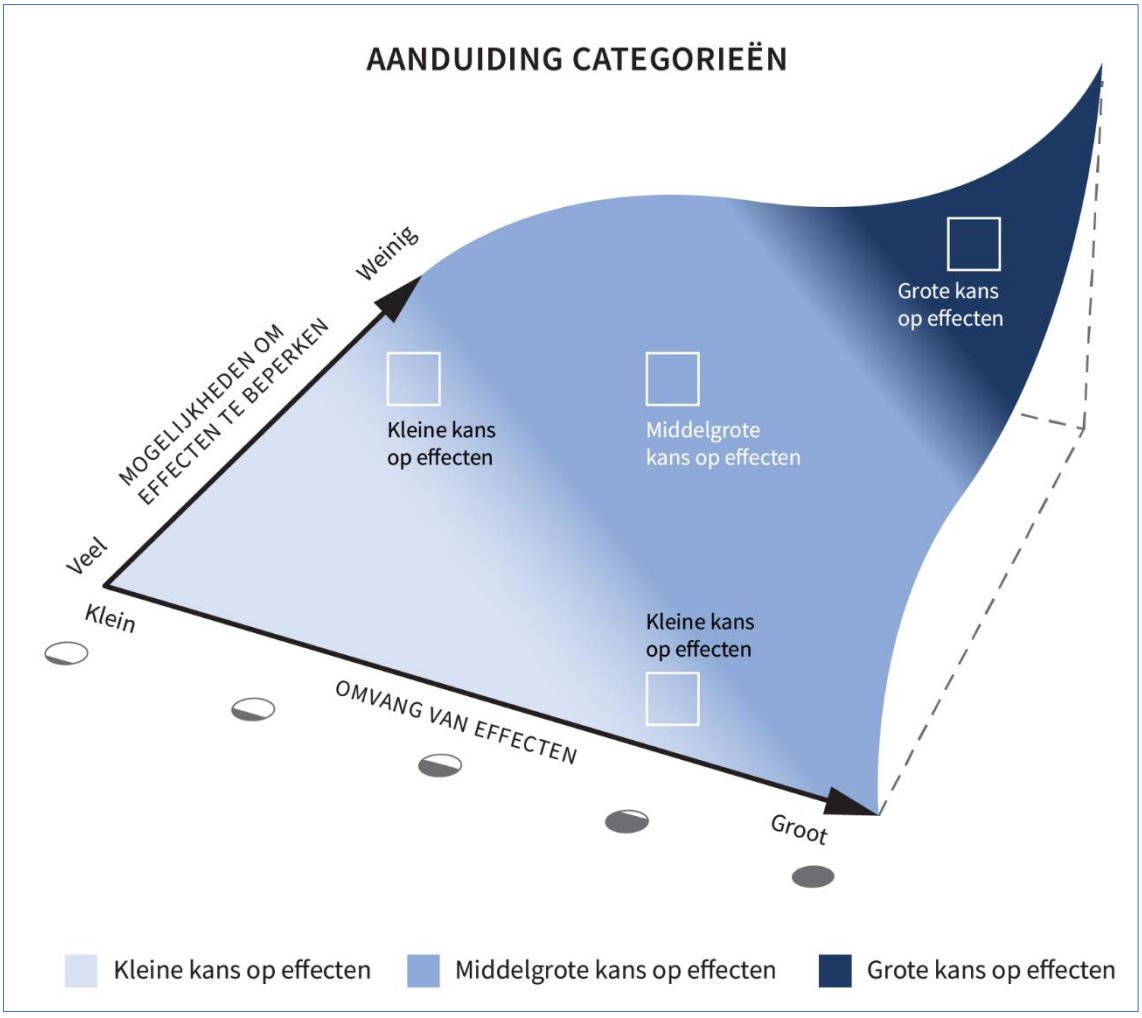
1. De beoordeling start met een kwalitatieve beschrijving van de effecten op ieder milieuaspect binnen een laag. Deze beschrijving is gebaseerd op expert judgement en geografische analyses.
2. Op basis van deze beschrijvingen is een analyse gemaakt van de effecten per laag. Er is hierbij ook ingegaan op tijdelijke en permanente effecten, mogelijkheid tot beperken en onomkeerbaarheid van effecten.
3. De beoordeling per laag is uitgedrukt in kans op effecten en weergegeven met drie kleuren blauw en een cijfer (zie Tabel 3.2).

Tabel 3.2 Definitie aanduiding categorieën, bijbehorende kleuren en een toelichting

Kleuraanduiding	Definitie beoordeling	Toelichting
1	Kleine kans op effecten	• Omvang van effecten is klein • Omvang van effecten is (middel)groot en veel mogelijkheden om omvang effecten te beperken
2	Middelgrote kans op effecten	• Omvang van effecten is middelgroot • Omvang van effecten is groot en er zijn mogelijkheden om omvang effecten te beperken
3	Grote kans op effecten	• Omvang van effecten is groot en weinig tot geen mogelijkheden om omvang effecten te beperken

De te beoordelen robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes bevatten onderdelen van het energie-systeem die (mogelijk) gerealiseerd worden. De exacte locatie voor deze onderdelen is niet bekend. Dit betekent dat de effectanalyse globaal is en is uitgedrukt in ‘kans op effecten’ waarmee de omvang van de verwachte effecten en de mogelijkheid om de omvang van de effecten te beperken, aan is gegeven. De samenhang tussen omvang van de effecten en mogelijkheid tot het beperken van deze effecten, is visueel weergegeven in Figuur 3.4. De kleuren corresponderen met de kleuren uit Tabel 3.2.

Figuur 3.4 Categorisering beoordeling aan de hand van omvang en mogelijkheden tot beperking van effecten



Referentiesituatie

Vanuit de MER-systematiek worden alternatieven beoordeeld ten opzichte van een referentiesituatie. De referentiesituatie die bestaat uit de huidige situatie plus de energie-infrastructuur in 2030 (zie paragraaf 2.3).

3.4 Welvaartsanalyse

3.4.1 Inleiding

In deze paragraaf staat de toelichting van de beoordelingssystematiek van het thema Welvaart. Een uitgebreide toelichting op de methodiek te vinden in Bijlage XII. Dit thema is uitgewerkt voor de structuurkeuzes, aangezien welvaartseffecten een relevant afwegingscriterium zijn voor de keuzes die gemaakt kunnen worden. Welvaartseffecten zijn niet uitgewerkt voor de robuuste ontwikkelingen omdat die naar verwachting in ieder geval nodig zijn en daar geen keuze gemaakt kan worden.

Voor het PEH wordt voor de beoordeling van de welvaartseffecten aangesloten bij het afwegingsinstrument maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA). Een kenmerk van de MKBA is dat naast

financiële kosten en baten (voor gebruiker of producent) ook maatschappelijke kosten en baten (voor de gehele samenleving) worden meegenomen. Door middel van een MKBA kunnen de huidige en de toekomstige voor- en nadelen van de structuurkeuzes voor de samenleving als geheel zo objectief mogelijk (in euro's) in kaart worden gebracht. Een MKBA wordt ingezet vanuit een ruime opvatting van het begrip welvaart.

Het energiesysteem (van productie, transport tot opslag en distributie naar de eindgebruiker) levert de Nederlander de mogelijkheid goederen en diensten te produceren en consumeren, en daarmee voorziet het in economisch nut. Daarmee worden in principe de financiële effecten in alle schakels van het energiesysteem (productie, energienetten voor transport en distributie en opslag voor matching van vraag en aanbod) meegenomen. Naast het energiesysteem neemt een MKBA ook immateriële zaken mee, die geen prijs op een markt hebben. Dit zijn bijvoorbeeld effecten op milieu, landschap, natuur en ruimtelijke kwaliteit. Ook hier geldt dat alle schakels van het energiesysteem worden meegenomen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen effecten die niet door de initiatiefnemer (de partij die verantwoordelijk is voor de infrastructuur) worden meegewogen en effecten die wel onderdeel zijn van financiële afweging bij de aanleg ervan.

In de welvaartsanalyse zijn drie typen effecten onderscheiden:

- **Directe effecten**: de voor- en nadelen van de opties binnen een structuurkeuze ten opzichte van elkaar voor de exploitant.
- **Indirecte effecten**: afgeleide effecten die voortvloeien uit de directe effecten van de structuurkeuzes, preciezer gesteld: effecten die niet een rechtstreeks gevolg zijn van een optie binnen een structuurkeuze en die optreden bij partijen die niet direct betrokken zijn.
- **Externe effecten**: dit betreft de effecten die niet beoogd zijn door de gebruiker. Deze zijn vaak moeilijk in geld uit te drukken omdat markten – en dus prijzen – ontbreken. Hieronder vallen effecten op milieu en ruimtelijke effecten voor de omwonenden.

3.4.2 Afbakening en uitgangspunten

In deze welvaartsanalyse zijn alleen effecten meegenomen als ze differentiëren binnen een structuurkeuze, bijvoorbeeld de elektriciteitsproductie. Als deze bij beide opties gelijk is, zijn effecten hiervan buiten beschouwing gelaten. In de analyse is gekeken naar het verschil tussen beide opties, en als er geen verschil is, vallen deze effecten tegen elkaar weg. Aangezien geen complete MKBA uitgevoerd is, en alleen een deel van de effecten in beeld is gebracht, is de beoordeling van dit thema een welvaartsanalyse genoemd. Het verschil met een 'klassieke' MKBA is dat in de welvaartsanalyse geen vergelijking wordt gemaakt met een zogenaamd nulalternatief. Dit betekent ook dat de resultaten van de afzonderlijke analyses van de structuurkeuzes niet tot één eindresultaat leiden. Per structuurkeuze is er sprake van een verschillende vergelijking. Dit betekent ook dat de resultaten niet kunnen worden gebruikt om keuzes onderling te rangschikken, ze gelden uitsluitend voor de opties binnen de structuurkeuze.

De scope van de welvaartsanalyse betreft welvaarteffecten voor alle inwoners van Nederland. Dit is voor rijksbeleid de meest voor de hand liggende keuze. Als er substantiële welvaartseffecten voor het buitenland zijn, wordt dit wel in beeld gebracht, maar telt dit niet mee in het MKBA-saldo. Daarnaast valt ook het offshore deel buiten de scope van PEH en daarmee van de welvaartsanalyse. Welvaartseffecten die te maken hebben met offshore activiteiten zijn wel benoemd, maar zijn niet verder uitgewerkt. Daarnaast zijn positieve effecten van een klimaatneutrale energievoorziening niet meegenomen, aangezien er alleen

naar verschillen tussen de opties binnen de structuurkeuze gekeken wordt en alle structuurkeuzes in lijn zijn een volledig klimaatneutrale energievoorziening in 2050.

3.4.3 Beoordelingskader

De resultaten zijn gepresenteerd in een contante waarde. Alle kosten en baten zijn verrekend met een discontovoet van 2,25%, conform aanbevelingen van de Werkgroep Discontovoet (Ministerie van Financiën, 2020). De kosten en baten zijn gepresenteerd aan de hand van de effecten die bij de verschillende partijen optreden. Er is géén rekening gehouden met sectorspecifieke financieringskosten en risico-opslagen, tenzij anders vermeld (bijvoorbeeld kernenergie). Niet-gekwantificeerde effecten zijn kwalitatief besproken. Deze hebben een positief dan wel negatief effect op het eindsaldo. Bij alle uitkomsten moet dus rekening worden gehouden met niet-gekwantificeerde posten.

Om maatschappelijke effecten in te schatten zijn eerst de fysieke projecteffecten van opties ingeschat (bijvoorbeeld capaciteit van nieuwe opwek, transport, opslag en geleverde energie). Het gaat hierbij om volume-effecten, bijvoorbeeld om het aantal huishoudens dat hinder ondervindt van een windturbine of hoogspanningsverbinding. Maatgevend voor deze effecten zijn functionele eenheden zoals het aantal kilometers extra hoogspanningskabel en aantal woningen dat naar verwachting visuele of milieuhinder ondervindt als gevolg nieuwe energiefuncties. Hierna zijn de projecteffecten vertaald naar welvaarts-effecten, uitgedrukt in euro's. Om hiertoe te komen zijn in eerste instantie de volume-effecten in kaart gebracht per type gebied: landbouw, bebouwd, industrie en recreatie. Vervolgens is op basis van kengetallen een inschatting gemaakt van het gemiddeld aantal omwonenden dat een kans op hinder ondervindt en de omvang hiervan. Op basis van fysieke kengetallen is een inschatting gemaakt van het verwachte welvaartsverlies van omwonenden. Daarbij maken we onderscheid tussen effecten die niet door de initiatiefnemer (de partij die verantwoordelijk is voor de infrastructuur) worden meegewogen en effecten die wel onderdeel zijn van financiële afweging bij de aanleg ervan. Een voorbeeld van de laatste betreft de uitkoop van gevoelige bestemmingen in de buurt van hoogspanningsleidingen (de zogenaamde specifieke magneetveldzone). Hiermee vindt vrijwillige compensatie plaats van geleden hinder (welvaartsverlies). Met een dergelijke uitkoopregeling krijgen zogenaamde externe ruimtelijke effecten een prijs in de gemaakte ruimtelijke afweging, gericht op wel of niet aanleggen in een gebied en de specifieke tracékeuzes.

3.5 Uitvoerbaarheid & Doelbereik

3.5.1 Inleiding

In de Notitie Reikwijdte en Detailniveau (NRD) voorafgaand aan deze IEA[33] is opgenomen dat het thema **uitvoerbaarheid** wordt beoordeeld "aan de hand van technische, economische en juridische risico's bij realisatie van de ontwikkelingen en de mate van samenhang tussen de lusten en de lasten". Voor het thema **doelbereik** is in de NRD opgenomen dat gekeken wordt in "hoeverre de uitspraken (reserveringen, ontwikkelrichtingen en generiek beleid) uit het PEH voldoen aan de beleidsdoelstelling van tijdig te zorgen voor voldoende ruimte voor de nationale energiehoofdstructuur, op basis van een integrale afweging met andere opgaven en belangen, binnen een (inter)nationale context en waarbij een goede leefomgevings-kwaliteit randvoorwaarde is".

[33] De NRD is te vinden op: www.rvo.nl/sites/default/files/2021/04/Concept-Notitie-Reikwijdte-en-Detailniveau-Programma-Energiehoofdstructuur.pdf

Inmiddels is er twee jaar verstreken sinds de publicatie van de publicatie van de NRD en is dit beoordelingskader achterhaald en is het niet meer logisch (lees zinvol) toe te passen. De redenen hiervoor zijn het abstracte niveau van het onderzoek (o.a. met scenario's, toekomstige onzekerheden), de aangepaste methodiek van het onderzoek (met robuuste ontwikkelingen en structuurkeuzes) en de afhankelijkheden van nog te maken keuzes voor het energiesysteem. Specifiek voor doelbereik geldt dat alleen uitspraken in PEH worden opgenomen die bijdragen aan de beleidsdoelstelling en daarmee kan het beoordelen volgens de NRD-systematiek leiden tot het openen van een al open deur.

Daarnaast is er tijdens het opstellen van deze IEA besloten tot het opstellen van het Programma Energiesysteem (PES) dat is gericht op maken van keuzes over de inrichting van het integrale energiesysteem in 2050 en welke maatregelen (inclusief ruimtelijke borging), middelen en instrumenten over de gehele beleids- en energieketen daarvoor nodig zijn. Dit gebeurt onder meer door het opstellen van het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)[34] met daarin beleid voor de gewenste ontwikkeling van het energiesysteem richting 2050. Een van de uitgangspunten van het NPE is meer sturen op afstemming van vraag, aanbod en infrastructuur, via ruimtelijk beleid. Het PEH is het ruimtelijke programma voor de energiehoofdstructuur en de uitkomsten van het PEH vormen input voor het PES.

De thema's Uitvoerbaarheid & Doelbereik vormen ook veel meer een slotsom aan het einde van het onderzoek dan aparte thema's naast Systeemefficiëntie, Milieu & Ruimte en Welvaart. Dit komt het meest duidelijk naar voren in dat delen van Uitvoerbaarheid & Doelbereik in verschillende deelonderzoeken zijn opgenomen. Bijvoorbeeld de verdeling van lusten en lasten in de Welvaartanalyse, de toekomstvastheid die is ingebouwd door te werken met scenario's, robuuste ontwikkelingen en systeemkeuzes en de verschillen- en gevoeligheidsanalyse. Er is daarom voor gekozen om Uitvoerbaarheid & Doelbereik op een andere manier 'in te vullen' en het meer de aard van een beschouwing/conclusie te laten hebben.

3.5.2 Afbakening, uitgangspunten en beoordelingskader

Uitvoerbaarheid

Twintig jaar is een lange periode en daarom is het wenselijk om een beeld te krijgen welke ruimte voor uitbreidingen van energie-infrastructuur naar verwachting als eerste nodig is in de periode tussen 2030 en 2040 en welke ruimte pas na 2040 nodig is. Hiervoor wordt een inschatting van gemaakt door de oorzaken van benodigde uitbreidingen te vergelijken met de tijdlijn van verwachte ontwikkelingen, zoals de uitrol van windenergie op zee. Er wordt ingegaan op de tijdlijn van de ontwikkelingen van elektriciteit, waterstof en overige buisleidingen. De invulling hiervan is te vinden in paragraaf 5.6.1 en Bijlage XIV.

Doelbereik

PEH is een uitwerking van de NOVI en daarom wordt beoordeeld in welke mate de drie afwegingsprincipes van de NOVI ingevuld kunnen worden bij de geschetste ontwikkelingen van de energie-infrastructuur. Deze principes helpen bij het afwegen en prioriteren van de verschillende belangen en opgaven en betreffen:

1. Combinaties van functies gaan voor enkelvoudige functies: het streven is zoeken naar maximale combinatiemogelijkheden tussen functies, gericht op een efficiënt en zorgvuldig ruimtegebruik.
2. Kenmerken en identiteit van een gebied staan centraal: neem deze specifiek mee in de afweging.
3. Afwentelen wordt voorkomen: dit kan zowel betrekking hebben op tijd als op plaats.

Voor de beoordeling van doelbereik is in paragraaf 5.6.2 een beschouwing gegeven per principe.

[34] De voortgang van NPE is te vinden op: www.rvo.nl/onderwerpen/energiesysteem/nationaal-plan-energiesysteem

4 Resultaten beoordeling robuuste ontwikkelingen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat de beoordeling van robuuste ontwikkelingen. In paragraaf 3.3 is de beoordelingssystematiek voor het thema Milieu & Ruimte uitgelegd. Robuuste knelpunten treden op in elk van de zeven verkende scenario's waarbij robuuste ontwikkelingen zorgen voor de oplossing van deze knelpunten.
De robuuste ontwikkelingen zijn beoordeeld voor het thema Milieu & Ruimte en niet voor de thema's Systeemefficiëntie en Welvaart. De reden is dat deze knelpunten sowieso opgelost moeten worden voor een betrouwbaar en werkend energiesysteem in Nederland in 2050. Dit betekent dat Systeemefficiëntie niet relevant is omdat een betrouwbaar energiesysteem een basisvoorwaarde is. Ook voor de Welvaartsanalyse is een werkend systeem een randvoorwaarde.

De hier beoordeelde robuuste ontwikkelingen hebben een ruimtelijke impact. Veel knelpunten worden opgelost door middel van redispatch[35], verzwaring van verbindingen of uitbreidingen binnen het ruimtebeslag van bestaande infrastructuur. Daarnaast zijn veel aanpassingen in het hoogspanningsnet al opgenomen binnen het IP2022 (TenneT, 2022). Voor verbindingen voor warmte en overige buisleidingen (CO_2, chemicaliën en aardolie(producten)) zijn geen robuuste knelpunten voorzien, deze zijn daarom niet verder in dit hoofdstuk benoemd.

4.2 Beoordeling Milieu & Ruimte

4.2.1 Te beoordelen robuuste ontwikkelingen

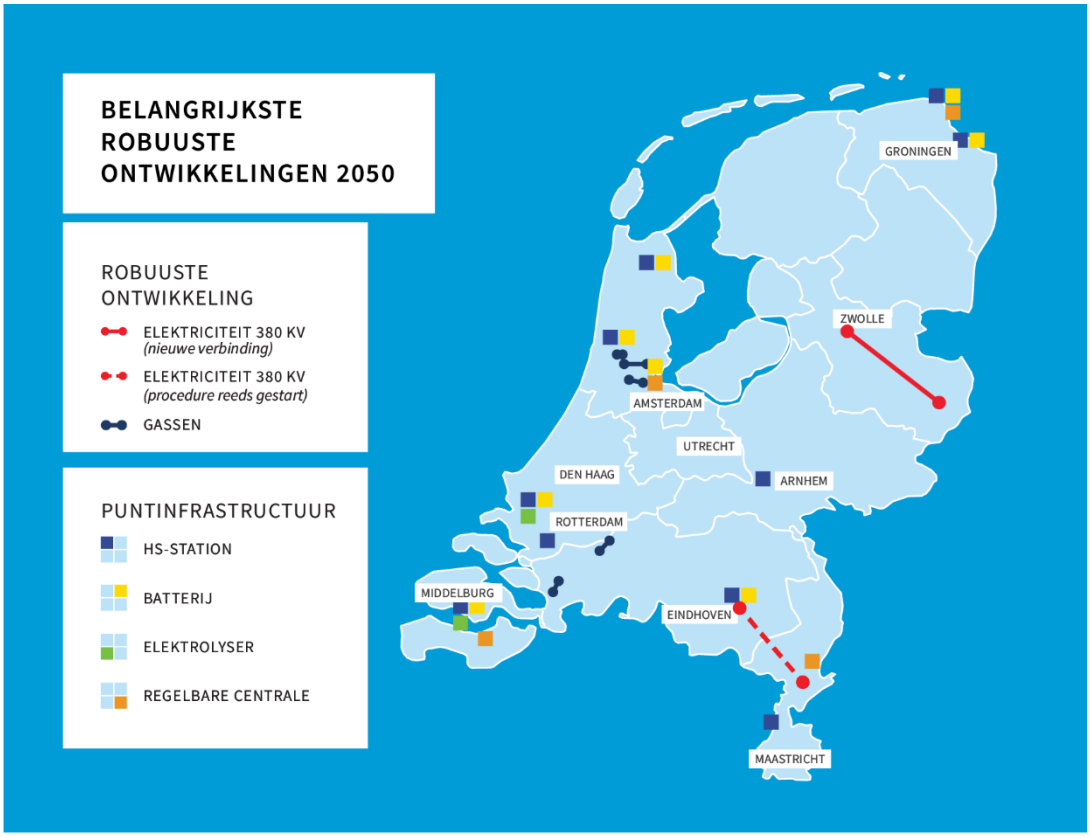
Deze onderliggende paragraaf bevat de weergave van de uitgebreide beoordeling van de robuuste ontwikkelingen in Bijlage XIa. De onderdelen die beoordeeld zijn, zijn verbindingen (elektriciteit en waterstof) en puntinfrastructuur ((converter)stations, batterijen, elektrolysers en regelbare centrales).
In Figuur 4.1 staan de robuuste ontwikkelingen op kaart. Onder het figuur is per onderdeel de beoordeling Milieu & Ruimte besproken. Hierbij geldt het volgende:

- De hoogspanningsverbindingen zijn individueel toegelicht.
- Bij puntinfrastructuur ((converter)stations, elektrolysers, batterijen[36] en regelbare centrales) ligt de focus op grotere locaties waar een ruimtebeslag van 10 ha of meer wordt verwacht.
- De verbindingen voor waterstof zijn gezamenlijk beoordeeld vanwege de beperkte omvang.

[35] Redispatch: Ingreep van de netbeheerder om de productie van een installatie te beperken en te vervangen door een beroep te doen op een andere installatie. Deze ingreep dient om de congestie op het net te lossen.

[36] In de scenario's die voor deze IEA zijn gebruikt, zijn locaties van batterijen modelmatig verdeeld en vanuit technisch en ruimtelijk perspectief logisch gepositioneerd nabij HS-stations. Het is uiteraard mogelijk dat in werkelijkheid batterijen op deze locaties vanuit het energiesysteem of andere afwegingen bezien niet mogelijk of wenselijk zijn of dat een andere locatie beter geschikt is. Om toch een beoordeling te kunnen maken op het thema Milieu & Ruimte zijn in deze bijlage concrete locaties opgenomen.

Figuur 4.1 Overzicht belangrijkste robuuste ontwikkelingen verbindingen en puntinfrastructuur



4.2.2 Landelijk beeld

In deze paragraaf wordt een landelijk beeld geschetst van de robuuste knelpunten en ontwikkelingen die optreden in het energiesysteem op basis van de zeven gebruikte scenario's. Het blijkt dat voor punt-infrastructuur veel nieuwe infrastructuur is voorzien op veel verschillende locaties. Met name de locaties waar aanlanding van windenergie op zee plaatsvindt of waar nu al sprake is van veel samenkomende elektrische infrastructuur wordt een groot ruimtebeslag verwacht.

Een kanttekening bij de omvang van het ruimtebeslag van robuuste ontwikkelingen is dat dit een minimaal ruimtebeslag betreft. Afhankelijk van te maken ontwikkelingen en keuzes in het energiesysteem richting 2050 (zoals aangegeven met de structuurkeuzes) kan het ruimtebeslag op een specifieke locatie voor puntinfrastructuur behoorlijk veel groter zijn of ervoor zorgen dat er nieuwe (hoogspannings)verbindingen gerealiseerd moeten worden (zie tekstkader in paragraaf 4.2.4). Dit is met name het geval op locaties in industrieclusters waar ook aanlanding van windenergie op zee plaatsvindt. Zie hiervoor de structuurkeuzes in paragrafen 5.2.1 en 5.2.2. Het ruimtebeslag van de robuuste ontwikkelingen in dit hoofdstuk geeft de basis waarmee minimaal rekening moet worden gehouden en die naar gelang verschillende keuzes en ontwikkelingen in het energiesysteem groter kan zijn.

4.2.3 Hoogspanningsverbindingen

Het aantal hoogspanningsverbindingen, dat als robuuste ontwikkeling richting 2050 is aangemerkt, is beperkt. Dit heeft een aantal redenen. Zo zijn er veel projecten die op dit moment worden uitgevoerd of gepland zijn voor realisatie voor 2030 (TenneT, 2022), gaat het enkel om knelpunten met extra ruimte-

vraag (een verzwaring heeft geen ruimtelijk effect) en kan realisatie van extra infrastructuur door toepassing van flexibiliteitsmiddelen en redispatch knelpunten worden vermeden. Daarnaast is het optreden van knelpunten met ruimtevraag vaak afhankelijk van structuurkeuzes.

Op het 380kV-hoogspanningsnet komen er twee robuuste knelpunten naar voren waarvoor een nieuwe hoogspanningsverbinding noodzakelijk is. Dit zijn Eindhoven–Maasbracht[37] en Zwolle–Hengelo[38], beide bestaande verbindingen. De beoordeling is in Tabel 4.1 aangeduid met de kleuren uit de beoordelings-systematiek en daaronder kort toegelicht (zie Bijlage XIa voor de uitgebreide beoordeling).

Tabel 4.1 Beoordeling van de tracéopties voor Milieu & Ruimte

Verbinding & tracéopties	Occupatie	Netwerk	Ondergrond
Eindhoven–Maasbracht			
Parallel	2	1	2
Westelijk	2	2	2
Oostelijk	2	2	2
Zwolle-Hengelo			
Parallel	2	1	1
Zuidelijk	1	2	2
Noordelijk	2	3	3
Omschrijving van laag	Occupatie: ruimtelijke in-richting met snelle veranderingen	Netwerk: ruimtelijke structuur zoals infrastructuur met middellange verandertermijn	Ondergrond: ruimtelijke drager met laag dynamisch niveau en lange verandertermijn
Legenda (zie ook par. 3.3)	Kleine kans op effecten aangeduid met lichtblauw en cijfer 1	Middelgrote kans op effecten aangeduid met middelblauw en cijfer 2	Grote kans op effecten aangeduid met donkerblauw en cijfer 3

De drie onderzochte tracéopties (parallel, westelijk en oostelijk) van de bovengrondse 380kV-verbinding **Eindhoven–Maasbracht**[39] liggen in een gevarieerd gebied dat bestaat uit diverse stedelijke en natuur-gebieden en wordt gekenmerkt door agrarisch grondgebruik. Nabij Maasbracht wordt de rivier de Maas gekruist. De drie tracéopties voor een nieuwe verbinding hebben een lengte tussen ongeveer 45 en 60 km. Het grootste aandachtspunt van de parallelle tracéoptie is het kruisen van enkele bebouwde gebieden, dit kan effecten hebben op de leefomgeving in de occupatielaag. Daarnaast zijn er mogelijke effecten op Natura 2000-gebied Groote Peel. Voor de westelijke en oostelijke tracéoptie geldt hetzelfde. Daarnaast wordt bij de westelijke tracéoptie NNN-gebied met een lange ontwikkelduur gekruist en zijn er mogelijk effecten op Natura 2000-gebieden Stabrechtse Heide en Beuven en Weerter- en Budelerbergen en Ringselven. Voor de oostelijke tracéoptie wordt tussen Horn en Heel NNN-bosgebied gekruist en zijn er mogelijk effecten op Natura 2000-gebieden Deurnsche Peel en Mariapeel en Leudal.

De onderzochte tracéopties (parallel, noord en zuid) van de bovengrondse 380kV-verbinding **Zwolle-Hengelo** liggen in een overwegend agrarisch gebied met verspreide woonkernen en enkele

37 Deze verbinding is al opgenomen in het IP2022 van TenneT (TenneT, 2022).

38 Dit robuuste knelpunt is mogelijk het gevolg van de modellering van de uitwisseling van elektriciteit met het buitenland in het netmodel van TenneT.

39 Bij aanvang van het onderzoek voor deze IEA, de doorrekeningen en de daaropvolgende knelpuntanalyse is de verbinding Eindhoven–Maasbracht naar voren gekomen als robuust knelpunt. Inmiddels is de uitbreiding van deze verbinding opgenomen in het IP2022 en wordt in het derde kwartaal 2023 een RCR-procedure gestart voor de uit-breiding van deze verbinding, Het ruimtebeslag en de effecten zijn in deze paragraaf wel beoordeeld en geven een indicatie van mogelijke effecten. Dit kan worden meegenomen in de te starten RCR-procedure waarbij in meer detail onderzoek naar verschillende tracés gaat plaatsvinden.

natuurgebieden waaronder de Sallandse Heuvelrug. De lengte ligt tussen ongeveer 60 en 70 km. In het gebied liggen (niet uitputtend) de woonkernen Zwolle, Dalfsen, Raalte, Hardenberg, Holten, Almelo, Borne en Hengelo. Het grootste aandachtspunt voor de parallelle tracéoptie in de occupatielaag is het kruisen van bebouwd gebied tussen Almelo en Wierden. De zuidelijke tracéoptie kruist enkele NNN-gebieden met een lange ontwikkelingsduur en landschap is een aandachtspunt in de omgeving van landgoed Schoonheten. Voor de noordelijke tracéoptie zijn er verschillende aandachtspunten. De tracéoptie ligt nabij enkele woonkernen, ligt gedeeltelijk in recreatief gebied, kruist een laagvliegroute en scheert langs Nationaal Landschap Noordoost-Twente. Op het gebied van natuur worden enkele NNN-gebieden gekruist met een lange ontwikkelingsduur en is er aan de rand van Natura 2000-gebied Uiterwaarden Zwarte Water en Vecht doorkruising.

4.2.4 Puntinfrastructuur

Zoals in Tabel 4.2 is te zien, zijn er op veel verschillende locaties robuuste ontwikkelingen voor punt-infrastructuur voorzien. In deze paragraaf zijn locaties beoordeeld met een robuust ruimtebeslag rondom de industriële clusters en locaties waar veel ontwikkelingen worden verwacht. De overige locaties met robuuste ontwikkelingen staan in Bijlage XIa. De beoordeling is in Tabel 4.2 aangeduid met de kleuren uit de beoordelingssystematiek en daaronder kort toegelicht.

Tabel 4.2 Beoordeling van puntinfrastructuur voor Milieu & Ruimte

Puntinfrastructuur	Ruimte-beslag (ha)	Occupatie	Netwerk	Ondergrond
Chemelot				
Graetheide/Chemelot	10	2	1	1
Noordoost Nederland				
Delfzijl/Weiwerd	15	1	1	2
Eemshaven	25	1	1	1
NZKG				
Amsterdam Hemweg	10	2	1	1
Beverwijk/NZKG[40]	45	1	3	3
Omgeving Rotterdam				
Rotterdams havengebied	140	2	3	2
Simonshaven/omgeving[41]	10	1	3	2
Zeeland				
Borssele/Sloegebied	95	2	3	2
Overig				
Middenmeer/Den Helder	35	1	1	1
Omschrijving van laag		Occupatie: ruimtelijke inrichting met snelle veranderingen	Netwerk: ruimtelijke structuur zoals infrastructuur met middellange verandertermijn	Ondergrond: ruimtelijke drager met laag dynamisch niveau en lange verandertermijn
Legenda (zie ook par. 3.3)		Kleine kans op effecten aangeduid met lichtblauw en cijfer 1	Middelgrote kans op effecten aangeduid met middelblauw en cijfer 2	Grote kans op effecten aangeduid met donkerblauw en cijfer 3

[40] Deze IEA is gebaseerd op scenario's waarbij is uitgegaan van de locatie Beverwijk, echter deze ontwikkeling kan ook in het bredere Noordzeekanaalgebied plaatsvinden.

[41] Deze IEA is gebaseerd op scenario's waarbij is uitgegaan van de locatie Simonshaven, echter deze ontwikkeling kan ook in een ruimer gebied plaatsvinden.

Op dit moment is er bij **Graetheide/Chemelot** een 150kV-station, hier is ook een 380kV-station voorzien vanuit de referentiesituatie. Het 150kV-station ligt nabij het industriële complex Chemelot waar ook Barro-locatie Geleen voor grootschalige energieopwekking ligt. Chemelot bestaat voornamelijk uit industriële bebouwing. In de omgeving liggen met name verspreide woningen. Het ruimtebeslag van maximaal ongeveer 10 ha betreft (onderdelen van) een nieuw 380kV-station (boven op het voorziene hoogspanningsstation). Hier lijkt ruimte voor aanwezig te zijn. Als het ruimtebeslag nabij het bestaande 150kV-station komt, gaat dit ten koste van landbouwareaal in Graetheide ten noorden van Chemelot. Bij realisatie binnen de Barro-locatie Geleen is het grootste aandachtspunt de effecten op externe veiligheid door de aanwezige risicocontouren van de bestaande industrie. De beheerders van het industrieterrein hebben daarnaast aangegeven dat er op het terrein weinig beschikbare ruimte is. Dit zijn aandachtspunten die mede de haalbaarheid bepalen.

Het 220kV-station **Weiwerd** ligt binnen de Barro-locatie **Delfzijl** waar industriële en havenactiviteiten plaatsvinden. Het water van de Oosterhornhaven loopt door de locatie heen. Aan de noordzijde ligt de Eems (ook Natura 2000-gebied), ten oosten en zuiden ligt agrarisch grondgebied met daarin verspreid bedrijfslocaties. Ten westen ligt de woonkern van Delfzijl. Het ruimtebeslag van ongeveer 15 ha bestaat uit (onderdelen van) een nieuw 220kV-station en batterijen. De aanleg van een nieuw 220kV-station bij Delfzijl/Weiwerd wordt al benoemd in het nieuwe IP2022 van TenneT, maar is daarin nog niet opgenomen als project. De locatie lijkt over voldoende ruimte te beschikken voor de robuuste ontwikkelingen. Zettingsgevoeligheid is wel een aandachtspunt bij Delfzijl/Weiwerd.

De **Eemshaven** is een havengebied met een industrieel karakter in het noorden van Groningen. Er vindt opwekking van energie plaats en er is veel elektrische infrastructuur aanwezig in het gebied. Het ruimtebeslag van ongeveer 25 ha bestaat uit (onderdelen van) een 380kV-station, een converterstation voor aanlanding van windenergie op zee, extra regelbare centrale en batterijen. Er lijkt voldoende ruimte beschikbaar voor de robuuste ontwikkelingen. Er zijn geen grote aandachtspunten vanuit Milieu & Ruimte door de beperkte aanwezigheid van woningen, doordat er geen effecten op Natura 2000-gebied Waddenzee worden verwacht en door de voorziene uitbreiding van het havengebied.

Bij **Amsterdam Hemweg** ligt een gasgestookte energiecentrale in het havengebied van Amsterdam met veel industrie. Dit gebied is ook aangewezen als Barro-locatie voor grootschalige energieopwekking. De voormalige kolencentrale Hemweg ligt hier ook. Het ruimtebeslag van ongeveer 10 ha bestaat uit batterijen en een regelbare energiecentrale. Dit lijkt haalbaar. De grootste aandachtspunten voor deze locatie zijn de aanwezige risicocontouren van bestaande bedrijven, de beschikbare ruimte in dit dynamische industriële gebied en de ontwikkeling van nieuwe woningbouw van Haven-Stad in de directe nabijheid. Deze woningbouw ligt weliswaar aan de andere zijde van de rijksweg A10, echter dit kan de mogelijkheden voor energie-infrastructuurontwikkelingen beperken. Deze aandachtspunten bepalen mede de haalbaarheid.

De omgeving van het bestaande 380kV-station **Beverwijk** (zie voetnoot 40) is divers met direct aan de oostzijde de rijksweg A9. Dit vormt een scheiding in het landschap. Aan oostzijde ligt een open agrarisch gebied dat ook NNN-gebied en onderdeel is van de Stelling van Amsterdam. Westelijk ligt stedelijk gebied met industrieterrein en iets noordelijk de woonkern van Beverwijk. Aan de zuidzijde ligt het Noordzeekanaal. Het ruimtebeslag van ongeveer 45 ha bestaat uit (onderdelen van) een 380kV-station, een converterstation voor aanlanding van windenergie op zee en batterijen. De zeer beperkt beschikbare ruimte bij Beverwijk is een aandachtspunt. Locaties zonder bebouwing bestaan uit NNN-gebied en zijn onderdeel van de Stelling van Amsterdam, hiermee is er een grote kans op effecten voor natuur, land-

schap en cultuurhistorie. De inschatting is dat realisatie van dit ruimtebeslag (gedeeltelijk) niet haalbaar is en afhankelijk is van de mogelijkheden van herontwikkeling van het gebied.

Het **Rotterdamse havengebied** is wereldwijd één van de grotere havens met veel industrie en overige havenactiviteiten. Het intensief industriële gebied is opgedeeld in drie Barro-locaties en kenmerkt zich door havengebonden activiteiten, waarbij een groot deel energie en chemisch gerelateerd is. Het ruimtebeslag van ongeveer 140 ha bestaat uit (onderdelen van) 380kV-stations, converterstation voor aanlanding van windenergie op zee, elektrolysers en batterijen. Het grootste aandachtspunt is het grote ruimtebeslag dat nodig is om de voorziene onderdelen te realiseren. Daarnaast zijn externe veiligheid en de Natura 2000-gebieden Voordelta en Voornes Duin belangrijke aandachtspunten. Het havengebied van Rotterdam is een groot gebied waarin keuzes voor de invulling van de ruimte in de toekomst mede bepalend zijn voor de haalbaarheid van de energie-infrastructuur.

Bij 380kV-station **Simonshaven** (zie voetnoot 41) ligt een open gebied met agrarisch karakter waar de rivier Bernisse stroomt. Er liggen verspreid enkele woonkernen. Aan de oostzijde ligt de venige polder De Biert, ook aardkundig waardevol gebied. Het ruimtebeslag van maximaal ongeveer 10 ha betreft (onderdelen van) een 380kV-station. Deze uitbreiding is ondertussen al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022[42]. De grootste aandachtspunten zijn de aanwezigheid van NNN-gebieden rondom het huidige station, zettingsgevoelige ondergrond, overstromingsgevoeligheid en het effect op landschappelijke waarden. Dit betreft met name aantasting van het open landschap en voormalige ambachtsheerlijkheid Biert. Deze aandachtspunten bepalen mede de haalbaarheid.

Borssele/Sloegebied kenmerkt zich door havengebonden activiteiten bij de Westerschelde en is ook een vestigingsplaats voor grootschalige energieopwekking waaronder de kerncentrale Borssele. Tussen nu en 2030 zijn er verschillende ontwikkelingen in de infrastructuur voorzien. Het gaat hier om aanlandingen van windenergie op zee en realisatie van een nieuw 380kV-station. De realisatie van dit nieuwe 380kV-station is ondertussen al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022. Het robuuste ruimtebeslag dat naar verwachting nog nodig is na 2030 is ongeveer 95 ha en bestaat uit ruimte nodig voor batterijen en elektrolysers. De grootste aandachtspunten zijn mogelijke effecten op Natura 2000-gebieden in de directe omgeving en de aanwezige risicobronnen in het gebied in combinatie met de voorziene onderdelen en de grootte van het totale ruimtebeslag. Goede lokale inpassing is van belang om de ontwikkelingen tot aan 2030 en vanaf 2030 te kunnen faciliteren.

De omgeving van **Middenmeer** bevat een 150kV-station en hier is ook een 380kV-station voorzien. Het gebied is overwegend agrarisch met kassencomplexen, akkerland en bollenteelt. Verder liggen de rijksweg A7, een groot datacenter en verspreide woningen in de omgeving. Het ruimtebeslag van ongeveer 35 ha bestaat uit batterijen, (onderdelen van) een nieuw 380kV-station en een converterstation voor aanlanding van windenergie op zee. Dit gaat mogelijk ten koste van agrarisch gebied, verder zijn er geen grote aandachtspunten op het gebied van Milieu & Ruimte en lijkt dit ruimtelijk uitvoerbaar.

Het is ook mogelijk dat het ruimtebeslag van Middenmeer plaatsvindt in **Den Helder**. Ten zuidoosten van Den Helder ligt Airport De Kooy, industrieterrein Oostoever en bedrijventerrein Kooypunt. Wat betreft energie-infrastructuur van nationaal belang ligt hier een buisleidingenstrook. Er wordt gekeken naar het gebied rondom de luchthaven en industrie/bedrijventerrein voor nieuwe energie-infrastructuur.

42 Dit is een additionele uitbreiding ten opzichte van de uitbreiding die al opgenomen is in het IP2020 (zie Figuur 2.2).

Deze omgeving bestaat hoofdzakelijk uit bollenvelden met verspreide woningen. Het ruimtebeslag van ongeveer 35 ha bestaat uit batterijen, (onderdelen van) een nieuw 380kV-station en een converterstation voor aanlanding van windenergie op zee. Dit gaat mogelijk ten koste van agrarisch gebied (bollenteelt), verder zijn er geen grote aandachtspunten op het gebied van Milieu & Ruimte en lijkt dit ruimtelijk uitvoerbaar.

Locaties puntinfrastructuur
De benodigde puntinfrastructuur die in deze IEA naar voren komt, is naar verwachting noodzakelijk om een robuust energiesysteem te garanderen. Het is mogelijk dat in vervolgprocedures blijkt dat het benodigde ruimtebeslag (deels) niet (meer) planologisch of fysiek inpasbaar is op een bepaalde locatie. Dit kan komen door nieuwe ontwikkelingen of een andere afweging van verschillende ruimtelijke belangen. De puntinfrastructuur kan ook op een grotere afstand van een locatie worden gerealiseerd. Dit heeft tot gevolg dat er extra verbindingen nodig zijn om de puntinfrastructuur aan te sluiten op het hoogspannings- of gasnet met extra ruimtebeslag en mogelijk milieueffecten.

4.2.5 Verbindingen voor waterstof

Uit de verkende scenario's zijn enkele robuuste knelpunten in het waterstofnet naar voren gekomen (zie Tabel 4.3). Deze bestaan uit aansluitleidingen voor vraag en/of productie van waterstof. Het gaat om leidingen naar regelbare centrales, of leidingen die elektrolysers aansluiten op het transportleidingennet. Bij vraag-gerelateerde knelpunten gaat het om regelbare centrales met waterstof als brandstof, bij productiegerelateerde knelpunten gaat het om elektrolysers. Omdat aangenomen is dat een nieuwe aansluitleiding in of nabij een bestaand buisleidingentracé kan worden aangelegd, is sprake van zeer beperkt extra ruimtebeslag (ongeveer 1 meter breed). Er kunnen lokaal knelpunten ontstaan door bijvoorbeeld bestaande infrastructuur die ruimtelijke knelpunten oplevert. Het beperkte extra ruimtebeslag en de op nationale schaal geringe lengte van de robuuste ontwikkelingen, maakt dat hier een kleine kans is op effecten.

Tabel 4.3 Robuuste ontwikkelingen van waterstofinfrastructuur

Traject	Oorsprong knelpunt	Lengte ca. (km)
Delfzijl	Vraag- en productie-gerelateerd	0,5
Chemelot	Vraag-gerelateerd	6
IJmuiden	Productie-gerelateerd	0,2
Westelijk havengebied Amsterdam	Vraag-gerelateerd	13
Schiphol	Vraag-gerelateerd	8
Moerdijk	Vraag-gerelateerd	3
Bergen op Zoom	Vraag-gerelateerd	3

5 Resultaten beoordeling structuurkeuzes en overige ontwikkelingen

5.1 Inleiding

Naast de robuuste ontwikkelingen is er nog veel onbekend rondom de ontwikkeling van het energiesysteem richting 2050. Er zijn verschillende keuzes die gemaakt moeten worden (hier structuurkeuzes genoemd) en enkele ontwikkelingen die nog onzeker zijn (hier systeemontwikkelingen genoemd). Deze structuurkeuzes en systeemontwikkelingen hebben invloed op de ruimte die nodig is voor de energiehoofdstructuur en zijn daarmee relevant voor het Programma Energiehoofdstructuur. De structuurkeuzes en systeemontwikkelingen zijn omschreven in paragraaf 2.7.

In dit hoofdstuk worden de structuurkeuzes individueel toegelicht en beoordeeld voor de thema's Systeemefficiëntie, Milieu & Ruimte en Welvaart. Door ze samen te bespreken wordt een breed beeld geschetst van de effecten per structuurkeuze. Daarnaast worden de belangrijkste effecten van de systeemontwikkelingen toegelicht. Dit is minder concreet dan de uitwerking van structuurkeuzes, aangezien de uitwerking van de systeemontwikkelingen onduidelijk is. Meer informatie over de resultaten van de beoordeling structuurkeuzes staat in Bijlage IX voor Systeemefficiëntie, in Bijlage XIb voor Milieu & Ruimte en Bijlage XII bevat de Welvaartsanalyse.

5.2 Beoordeling per structuurkeuze

5.2.1 Structuurkeuze 1: Aanlanding windenergie op zee, aan de kust of diep

In de toekomst wordt een groot deel van de elektriciteit opgewekt door windparken op de Noordzee. Al deze windstroom moet van de aanlandingslocaties naar de vraaglocaties getransporteerd worden, wat een grote impact heeft op het hoogspanningsnet aangezien er daardoor veel elektriciteit van de kust naar het binnenland (en naar het buitenland) getransporteerd moet worden. Deze elektriciteit kan getransporteerd worden via het reguliere hoogspanningsnet, maar het is ook mogelijk om een directe HVDC-verbinding naar een hoogspanningsstation in het binnenland te trekken. Dit heet diepe aanlanding. Bij deze structuurkeuze is aanlanding aan de kust (optie 1) vergeleken met diepe aanlanding (optie 2). Er is gekeken naar diepe aanlanding in Maasbracht en bij Diemen. Diepe aanlanding wordt een mogelijkheid als gekozen wordt voor het elektrisch aanlanden van grote hoeveelheden windenergie op zee (ruim meer dan 30 GW). Bij minder dan 30 GW elektrische aanlanding is optimalisatie van aanlanding aan de kust voldoende om te voorkomen dat forse uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk zijn (zie structuurkeuze 2 in paragraaf 5.2.2).

Vanuit **Milieu & Ruimte** leidt diepe aanlanding (optie 2) tot minder effecten. Door directe ondergrondse HVDC-verbindingen richting Maasbracht en Diemen zijn minder nieuwe bovengrondse 380kV-verbindingen nodig in Noord-Holland en tussen de Maasvlakte en Limburg. Er is een grote kans op effecten bij de aanleg van nieuwe bovengrondse 380kV-verbindingen, vooral in de ondergrondlaag. Het gaat hier om landschappelijke effecten en risico's op aanvaringsslachtoffers (vogels) in met name Zuid-Holland, Noord-Brabant en Noord-Holland. In de laatstgenoemde provincie zijn ook effecten op de Stelling van Amsterdam aan de orde. In dit gebied zijn de effecten dusdanig groot dat het de vraag is of de aanleg van nieuwe verbindingen op bovengrondse wijze haalbaar is. Bij ondergrondse verbindingen zijn met name effecten aan de orde in de bodem zoals verzilting, zettingsgevoeligheid en grondwaterbeschermingsgebieden.

Daarnaast zorgt diepe aanlanding (optie 2) voor minder benodigde ruimte voor puntinfrastructuur bij de aanlandingslocaties aan de kust. Op deze locaties is sprake van meervoudig ruimtebeslag van converter-stations, hoogspanningsstations, batterijen en elektrolysers terwijl de beschikbare ruimte op deze locaties beperkt is. Door diepe aanlanding wordt de ruimtelijke opgave van deze elementen verspreid over meerdere locaties. Bij Maasbracht is naar verwachting voldoende ruimte voor inpassing in de omgeving, bij Diemen is dit niet het geval vanwege de zeer beperkt beschikbare ruimte. Een overweging is om de diepe aanlanding bij Diemen te verplaatsen naar een locatie met meer ruimte voor de bijbehorende puntinfrastructuur.

Diepe aanlanding (optie 2) leidt naar verwachting tot hogere maatschappelijke kosten dan aanlanding aan de kust (optie 1), wat betekent dat deze optie slechter is beoordeeld voor **Welvaart**. Dit wordt geheel veroorzaakt door de verwachte hogere kosten van HVDC-infrastructuur in vergelijking met reguliere hoog-spanningsinfrastructuur. Er is nog veel onzekerheid over de kosten van HVDC-infrastructuur op land, al is het de verwachting dat deze in ieder geval een stuk hoger zijn. Doordat HVDC-infrastructuur ondergronds aangelegd wordt zijn, de externe kosten van diepe aanlanding lager, maar de externe kosten zijn zeer beperkt ten opzichte van de directe kosten voor het aanleggen van de infrastructuur. Welvaartsverliezen van hoogspanningskabels zijn in de berekeningen gebaseerd op planschadebedragen en uitkoopregeling in bestaande HS-tracés[43]. Diepe aanlanding (optie 2) heeft geen duidelijke voor- of nadelen op het gebied van **Systeemefficiëntie**.

Conclusie
Diepe aanlanding van windenergie op zee levert voor Milieu & Ruimte voordelen op, zowel voor verbindingen als voor puntinfrastructuur. Maar hier staan wel significant hogere kosten tegenover. Deze laatste kennen een aanzienlijke onzekerheidsbandbreedte.

5.2.2 Structuurkeuze 2: Aanlanding windenergie op zee, geconcentreerd of verspreid

Er zijn verschillende geschikte locaties aan de kust voor (elektrische) aanlanding van windenergie op zee. Het is de vraag hoeveel windenergie op zee je op elk van deze locaties wil laten aanlanden. Een efficiënte verdeling van het vermogen aan windenergie op zee over de aanlandingslocaties kan ervoor zorgen dat minder uitbreidingen aan hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk zijn. Bij deze structuurkeuze zijn twee mogelijke verdelingen vergeleken. Bij geconcentreerde aanlanding (optie 1), landt het grootste gedeelte van de windstroom aan in Noord- en Zuid-Holland, aangezien de elektriciteitsvraag daar het hoogst is. Bij gespreide aanlanding (optie 2), wordt de beschikbare transportcapaciteit van het hoogspanningsnet meegenomen in de afweging en wordt de windstroom meer evenredig verdeeld over de aanlandings-locaties. Dit leidt tot meer aanlanding in Zeeland en Groningen dan bij de optie waar het grootste gedeelte van de windstroom aanlandt in Noord- en Zuid-Holland. Bij deze structuurkeuze gekeken naar in totaal 30 GW elektrische aanlanding van windenergie op zee. Bij hogere vermogens elektrische aanlanding moet naar andere opties gekeken worden (zoals nog meer aanlanding op de aanlandingslocaties aan de kust of diepe aanlanding). Bij deze structuurkeuze is alleen naar effecten op land gekeken, de effecten op zee vallen buiten de scope van PEH en dit onderzoek.

[43] Merk op dat dit geen externe kosten zijn aangezien de initiatiefnemer de beperking van de hinder voor omwonenden beoogd heeft (in ontwerpkosten meegenomen).

Gespreide aanlanding (optie 2) is veel beter beoordeeld op **Systeemefficiëntie**. Er zijn in dit geval veel minder nieuwe uitbreidingen aan hoogspanningsverbindingen nodig, vanwege de beschikbare transportcapaciteit in Zeeland en Groningen. Dit leidt er ook toe dat gespreide aanlanding op **Welvaart** veel beter is beoordeeld. De (directe en externe) kosten voor nieuwe hoogspanningsverbindingen liggen bij deze optie een stuk lager. Verder zijn er geen significante verschillen in maatschappelijke kosten tussen de twee opties.

Ook voor **Milieu & Ruimte** is gespreide aanlanding (optie 2) duidelijk beter beoordeeld. Vanuit nationaal perspectief heeft gespreide aanlanding een minder grote kans op effecten. Er zijn veel minder nieuwe bovengrondse 380kV-verbindingen nodig waarbij ook de meest complexe tracés (met de grootste kans op effecten) niet hoeven te worden uitgebreid (voornamelijk in Noord-Holland). Daarnaast ontstaat bij geconcentreerde aanlanding (optie 1), met concentratie van de aanlanding in Noord-Holland en Zuid-Holland, een forse ruimtedruk van puntinfrastructuur op enkele locaties. Bij gespreide aanlanding wordt de ruimtedruk van puntinfrastructuur meer evenredig verdeeld over meerdere aanlandingslocaties.

Conclusie
Gespreide aanlanding heeft een betere beoordeling op alle beoordelingsthema's. Het is voor de integratie van windenergie op zee zinvol om goed te analyseren waar het vermogen van windenergie op zee het beste kan aanlanden, uitgaande van spreiding als basisprincipe.

5.2.3 Structuurkeuze 3: Locaties hernieuwbare opwek op land, spreiding of clustering

Er wordt in het Programma Energiehoofdstructuur geen keuze gemaakt over locaties van wind- en zonneparken. De beoordeling van deze structuurkeuze heeft als doel om in kaart te brengen wat de gevolgen zijn van locatiekeuzes van hernieuwbare opwek op land op de benodigde energiehoofdstructuur en om inzicht te bieden in de afwegingen tussen beide keuzes.

Tot 2030 worden de locaties van hernieuwbare opwek op land bepaald in de RES'en. Na 2030 is er voor de meeste van de gebruikte scenario's nog een additionele opgave voor hernieuwbare opwek op land tot aan 2050. Waar deze hernieuwbare opwek terechtkomt en hoe dit bepaald gaat worden is nog onduidelijk. Bij deze structuurkeuze is gekeken naar verschillende manieren om deze extra opgave voor hernieuwbare opwek op land te plaatsen, ofwel gespreid over het hele land (optie 1) of geclusterd op enkele geschikte locaties (optie 2).

Vanuit het perspectief van **Milieu & Ruimte** wordt clustering van hernieuwbare opwek op land (optie 2) beter beoordeeld ten opzichte van spreiding. Het totale ruimtebeslag verschilt nauwelijks tussen clustering en spreiding. Dit geldt ook voor het ruimtebeslag als gevolg van mogelijke nieuwe energie-infrastructuur, aangezien er geen significante verschillen zijn tussen de opties wat betreft benodigde nieuwe energie-infrastructuur van nationaal belang. Maar clustering van opwek leidt wel tot minder kans op effecten op de ondergrondlaag. Het gaat dan vooral om de aspecten landschap en ecologie. Bij clustering worden namelijk per saldo minder windturbines en zonnepanelen geplaatst in of nabij ecologische gevoelige gebieden en Nationale Landschappen. Lokaal is op de potentiële clusterlocaties wel kans op grote effecten op leefomgeving, landbouw, landschap en ecologie. Bij spreiding (optie 1) is er een grote kans op effecten op landschap en ecologie op nationale schaal.

Ook op het gebied van **Welvaart** wordt clustering van opwek (optie 2) beter beoordeeld dan spreiding. Terwijl de directe kosten niet veel van elkaar verschillen, zijn de externe kosten bij clustering wel

aanzienlijk lager. Dit is toe te schrijven aan het feit dat minder mensen visuele hinder ondervinden door hernieuwbare opwek te clusteren in wind- en zonneparken. Op het gebied van **Systeemefficiëntie** zijn er geen significante verschillen tussen clustering en spreiding van hernieuwbare opwek op land.

Conclusie
Uit de analyses volgt dat clustering van opwek op Milieu & Ruimte en Welvaart beter wordt beoordeeld dan spreiding. De keuze voor spreiding of clustering van hernieuwbare opwek heeft echter weinig invloed op de energiehoofdstructuur. De impact op de hoogspanningsnetten en de gastransportnetten is beperkt en het heeft geen impact op de totale behoefte aan energieopslag.

5.2.4 Structuurkeuze 4: Locaties clusters van elektrolysers

Er zijn verschillende locaties mogelijk voor het plaatsen van clusters van elektrolysers. Dat kan bijvoorbeeld direct bij grote hoeveelheden overschotten aan elektriciteit (bij het aanbod van elektriciteit), of op industrieclusters (bij de vraag naar waterstof) waar grote afnemers van waterstof zitten. Clusteren bij aanlandingslocaties van windenergie op zee heeft voordelen voor het hoogspanningsnet, aangezien lokale overschotten van elektriciteit niet getransporteerd hoeven te worden. Bij clustering van elektrolysers bij grote afnemers van waterstof is daarentegen minder transport van waterstof nodig. Als er grote hoeveelheden windenergie elektrisch aanlanden, ligt clustering van elektrolysers bij aanlandingslocaties meer voor de hand (optie 1). Bij minder grote hoeveelheden aanlanding windenergie op zee kan clustering bij grote afnemers van waterstof een interessante optie zijn (optie 2). In deze structuurkeuze worden de effecten van beide opties tegen elkaar afgewogen. De twee opties overlappen in Rotterdam, waar zowel aanlanding van wind op zee als grote groene waterstofvraag van de industrie verwacht wordt.

Clusteren van elektrolysers bij aanlandingslocaties (optie 1) is beter beoordeeld op het gebied van **Systeemefficiëntie**. De benodigde hoeveelheid nieuwe energie-infrastructuur is aanzienlijk kleiner als de clusters van elektrolysers bij de aanlandingslocaties van windenergie op zee geplaatst worden. Dat komt omdat de vraag en aanbod van elektriciteit dan zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst worden in de ruimte. Bij plaatsen van elektrolysers bij grote afnemers van waterstof (optie 2) zijn meer verzwaringen aan het hoogspanningsnet nodig dan bij plaatsing bij aanlandingslocaties windenergie op zee (optie 1) doordat er grote hoeveelheden elektriciteit getransporteerd moeten worden van aanlandingslocaties van windenergie op zee naar de locaties van elektrolysers. Bij het plaatsen van elektrolysers bij aanlandingslocaties is meer waterstoftransport noodzakelijk, maar hier zijn naar verwachting weinig nieuwe buisleidingen voor nodig.

Vanuit **Milieu & Ruimte** hebben de twee opties verschillende effecten. Plaatsen van elektrolysers bij aanlandingslocaties (optie 1) zorgt voor meer ruimtebeslag op plekken waar de ruimtedruk hoog is en er zijn enkele nieuwe aansluitleidingen nodig naar het waterstofnet. Bij de aanlandingslocaties Beverwijk, Geertruidenberg en Diemen is de ruimte voor het plaatsen van elektrolysers zeer beperkt. Het plaatsen van elektrolysers bij de vraag (optie 2) zorgt daarentegen voor ruimtebeslag en milieueffecten door meer nieuwe bovengrondse hoogspanningsverbindingen tussen Tilburg–Eindhoven, Weiwerd–Meeden en Robbenplaat–Weiwerd. Met name bij Tilburg–Eindhoven is er een grote kans op effecten vanwege het kruisen van Natura 2000-gebied en Nationaal Park Vincent van Gogh of Oostelbeerse Heide (afhankelijk van de tracéoptie). De andere verbindingen hebben een kleine kans op effecten. Bij het plaatsen van elektrolysers bij de vraag (optie 2) is er wel minder ruimtebeslag bij de aanlandingslocaties. Overigens komen locaties van aanlanding en locaties van vraag naar waterstof (industrieclusters) gedeeltelijk overeen (Rotterdamse haven, Borssele/Sloegebied). Vanuit nationaal perspectief heeft plaatsing van elektrolysers bij aanlandingslocaties windenergie op zee (optie 1) een gunstigere beoordeling omdat het

totale ruimtebeslag en de landschappelijke impact minder is. Lokaal kan dit echter anders zijn omdat het gebrek aan ruimte een groot knelpunt kan opleveren. Uitbreiding van een havenindustrieel cluster kan tot grote effecten leiden op nabijgelegen landbouw, natuur en woonkernen.

De **Welvaartseffecten** voor clustering bij aanlandingslocaties van windenergie op zee (optie 1) vallen positiever uit dan voor clustering bij industrieclusters (optie 2). In deze structuurkeuze is dit puur toe te schrijven aan de hogere directe kosten bij plaatsing elektrolysers bij afnemers van waterstof. Het plaatsen van elektrolysers bij industrieclusters vereist een dure uitbreiding van het hoogspanningsnet en leidt naar verwachting tot hogere kosten als gevolg van redispatch. Wel zijn er enkele voordelen te benoemen bij plaatsing van elektrolysers bij afnemers waterstof (optie 2). De industrie heeft invloed op de zuiverheid van de waterstof voor eigen gebruik. Bovendien kan restwarmte die ontstaat bij de productie van waterstof gebruikt worden voor verwarming van bijvoorbeeld kantoorgebouwen dicht bij de industrie, of -als de elektrolysers dicht bij een stedelijk gebied worden geplaatst- door de gebouwde omgeving.

Conclusie
Clustering van elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee wordt, ten opzichte van clustering bij industriële afnemers van waterstof, beter beoordeeld op welvaart en systeemefficiëntie aangezien bij deze optie minder uitbreidingen van energie-infrastructuur noodzakelijk zijn. Daardoor heeft het plaatsen van elektrolysers bij aanlandingslocaties windenergie op zee ook een gunstigere beoordeling op Milieu & Ruimte vanuit nationaal perspectief. Lokaal kan dit anders zijn omdat het gebrek aan ruimte bij aanlandingslocaties van windenergie op zee een groot knelpunt kan opleveren.

5.2.5 Structuurkeuze 5: Spreiding of clustering regelbare centrales

Richting 2050 neemt de vraag naar elektriciteit fors toe, terwijl de hernieuwbare opwek variabel is. Een groot deel van het jaar kan deze vraag ingevuld worden door productie van hernieuwbare bronnen (zon, wind), maar ook op de momenten dat het niet waait en de zon niet schijnt moet er voldoende geproduceerd worden om aan de vraag te voldoen. Daardoor is in 2050 fors meer regelbaar vermogen nodig in de vorm van elektriciteitscentrales.

Er is naar verwachting in totaal tot 20 GW extra aan regelbare centrales nodig in 2050. Deze regelbare centrales kunnen op verschillende locaties terechtkomen. Bij deze structuurkeuze is gekeken naar verschillende manieren om deze regelbare centrales te plaatsen. Ofwel verspreid over het land met veel kleine productie-eenheden (optie 1) ofwel gecentraliseerd met enkele grote eenheden op de bestaande Barro-locaties (optie 2).

Vanuit het perspectief van **Milieu & Ruimte** wordt clustering van regelbare centrales op de Barro-locaties (optie 2) beter beoordeeld in de ondergrondlaag op het aspect landschap in vergelijking met de verspreide plaatsing (optie 1). Vanuit de netwerklaag wordt spreiding juist beter beoordeeld door meer beschikbare ruimte. Bij spreiding neem het totale ruimtebeslag aanzienlijk toe, maar door de lagere ruimtedruk per locatie is de kans op effecten door beschikbare ruimte kleiner dan bij geclusterde plaatsing op de Barro-locaties. De geclusterde plaatsing van de regelbare centrales kan op verschillende Barro-locaties om aanvullende ruimte vragen die niet beschikbaar is, dit kan versterkt worden door beperkte beschikbaarheid van koelwater en daarom de noodzaak voor koeltorens. Wanneer een Barro-locatie uitgebreid wordt om de ruimte te faciliteren heeft dit grote effecten op landbouw, natuur en woonkernen in de nabijheid.

Spreiding van regelbare centrales (optie 1) wordt iets beter beoordeeld op **Systeemefficiëntie**. De keuze van clustering of het verspreid plaatsen van de regelbare centrales heeft naar verwachting weinig impact op de waterstof- en elektriciteitsinfrastructuur. Maar bij spreiding van regelbare centrales zijn er meer mogelijkheden voor TenneT om knelpunten in de hoogspanningsinfrastructuur operationeel op te lossen via redispatch. Als knelpunten niet operationeel opgelost kunnen worden kan dit in het ergste geval ertoe leiden dat vraag afgeschakeld moet worden. In dat geval ontstaan er lokaal problemen met de leverings-zekerheid. Vanuit het perspectief van **Welvaart** zijn er naar verwachting geen significante verschillen tussen beide opties.

Conclusie
Uit de analyses volgt dat clustering van regelbare centrales effecten op het landschap kan verminderen, maar daar staat tegenover dat er een grotere ruimtedruk komt op locaties met beperkte beschikbare ruimte. Daarnaast wordt spreiding van regelbare centrales iets beter beoordeeld op het gebied van systeemefficiëntie.

5.2.6 Structuurkeuze 6: Waterstofopslag in zoutcavernes of lege gasvelden

Vraag en aanbod van energie zijn in de toekomst, net als nu, niet volledig op elkaar afgestemd in de tijd. Het opslaan van waterstof in de ondergrond kan mogelijk[44] dienen als langetermijn-opslag (seizoens-opslag). Het is niet realistisch om deze hoeveelheden bovengronds op te slaan, omdat het gaat om zeer grote volumes. Deze structuurkeuze vergelijkt waterstofopslag in zoutcavernes (optie 1) met waterstof-opslag in lege gasvelden of gasbergingen (optie 2, waarbij de technische haalbaarheid (nog) niet bewezen is).

Opslag van waterstof in lege gasvelden of gasbergingen (optie 2) kent verschillende technische uit-dagingen en de technische haalbaarheid moet nog onderzocht worden. Naar verwachting is opslag in lege gasvelden -als uit onderzoek in de praktijk de haalbaarheid blijkt- pas op langere termijn mogelijk. Zoutcavernes (optie 1) zijn in de regel kleiner dan lege gasvelden, en er zijn niet voldoende bestaande cavernes geschikt voor opslag. De vijf huidige zoutcavernes in Zuidwending zouden in theorie zo'n 1 TWh waterstof op kunnen slaan. Uitbreiding van opslagcapaciteit naar ongeveer 10 TWh is de aanleg van ~36 cavernes nodig, waarbij een grote hoeveelheid zout geloogd wordt. Deze optie van waterstofopslag in alleen zoutcavernes, en geen aanvullende opslag, is alleen haalbaar als de vraag naar waterstof klein is. Wanneer er veel vraag naar en aanbod van waterstof is, maar deze niet goed op elkaar aansluiten in de tijd en een grote vraag naar langetermijn-opslag ontstaat, is het logisch om opslag in lege gasvelden of gasbergingen te onderzoeken. Lege gasvelden en gasbergingen, waarvoor waterstofopslag nog niet technisch bewezen en daarmee onzeker is, zouden in theorie vele malen grotere volumes kunnen bergen.

[44] Hier is het woord mogelijk gebruikt omdat ondergrondse opslag van waterstof in de praktijk nog onderzocht moet worden. Met name bij opslag in gasbergingen en lege gasvelden staan veel onderzoeksvragen open, bijvoorbeeld over invloed op zuiverheid van waterstof en de kwaliteit van een afdichtende laag. Voor opslag in zoutcavernes vindt al een pilot plaats.

Lege gasvelden en gasbergingen (optie 2) zijn beter beoordeeld op **Systeemefficiëntie**. Dit komt omdat voor de aanleg van zoutcavernes (optie 1) veel nieuwe energie-infrastructuur nodig is. De huidige gasbergingen en lege gasvelden zijn al verbonden met de gastransportleidingen van Gasunie. Zoutcavernes kennen wel voordelen in leveringszekerheid en kennen minder energieverliezen. Op dit moment worden zoutcavernes ook ingezet voor handel in energie. Omdat het bij zoutcavernes gaat over meerdere opslagen onder hoge druk, die afzonderlijk ingezet kunnen worden, wordt verwacht dat waterstof in zoutcavernes een hogere leveringszekerheid voorziet dan waterstof in lege gasvelden. Daarbij zijn in zoutcavernes de verliezen naar verwachting kleiner omdat zout in principe niet doorlatend is voor waterstof.

De **Welvaartseffecten** vallen positief uit voor waterstofopslag in zoutcavernes (optie 1). Opslag in zoutcavernes is een techniek die verder ontwikkeld is en draagt daarmee een minder groot risico met zich mee. Daarnaast kunnen de zoutcavernes waarschijnlijk gemakkelijker gebruikt worden voor de opslag van korte cycli. De dubbele inzet van zoutcavernes (voor seizoensopslag en arbitrage van kortetermijn-fluctuaties) in combinatie met zekerheid brengt extra economische waarde mee voor de eindgebruiker. Dit leidt tot een betere beoordeling op welvaart van opslag in zoutcavernes. Beide opslagen kunnen ook naast elkaar bestaan, uitgaande van een gunstige ontwikkeling van de techniek van waterstofopslag in lege gasvelden.

De effecten op het gebied van **Milieu & Ruimte** voor waterstofopslag in zoutcavernes (optie 1) zijn middelgroot voor de occupatielaag vanwege effecten op landbouw. De bovengrondse infrastructuur van de zoutcavernes (installaties) en de zoutwinning die eraan voorafgaat, gaan ten koste van landbouwgrond. Voor de ondergrondlaag is de kans op effecten groot door het mogelijk optreden van bodemdaling. Om de opslag van waterstof in zoutcavernes te realiseren, is in noordoost Nederland aanvullende infrastructuur nodig, zowel bovengronds (installaties voor putten en verwerking zout) als ondergronds (meerdere aansluitleidingen op het Nationaal Waterstofnetwerk). De kans op effecten als gevolg van de waterstofinfrastructuur zijn echter klein voor de occupatie-, netwerk- en ondergrondlaag. Het gebruik van bestaande gasbergingen en lege gasvelden (optie 2) hebben een kleiner bovengronds ruimtebeslag, maar er is een middelgrote kans op externe veiligheidseffecten vanwege de mogelijke vorming van het giftige waterstofsulfide. De technische haalbaarheid om onder andere dit verder te duiden dient nader onderzocht te worden.

Conclusie
Opslag van waterstof in zoutcavernes leidt tot een grotere ruimtelijke impact, maar kan geschikt zijn bij een beperkte omvang van de totale vraag naar waterstofopslag. De impact komt door installaties voor zoutwinning, injectie van waterstof en door aanleg van aanvullende infrastructuur om de clusters van cavernes met het Nationaal Waterstofnetwerk te verbinden. De realisatie van opslag van waterstof in lege gasvelden heeft een kleiner ruimtebeslag, maar kent nog veel onzekerheden. Dit moet eerst nader onderzocht worden voordat duidelijke uitspraken over milieueffecten gedaan kunnen worden.

5.2.7 Structuurkeuze 7: Toepassing van kernenergie

Kernenergie kan in 2050 een significant onderdeel uitmaken van de energiemix. Bij deze structuurkeuze is gekeken naar de plaatsing van 5,0 GW kerncentrales in Borssele/Sloegebied en 3,3 GW op de Maasvlakte. Hiervoor is in het scenario Europese Sturing kernenergie toegevoegd in plaats van wind op land (inclusief bestaande windturbines) en een deel van de gascentrales (optie 2)[45]. Om de effecten van kernenergie in beeld te brengen is dit vergeleken met het scenario Europese sturing zonder deze aanpassingen (optie 1). De kerncentrales worden geplaatst op de waarborgingslocaties vanuit het Barro, zijnde Borssele/Sloegebied en de Maasvlakte. In deze gebieden is naar verwachting ruimte voor vijf kerncentrales met een totaal vermogen van 8,3 GW. De kerncentrales worden must-run[46] ingezet, aangezien uit analyses is gebleken dat dit economisch de meest voordelige inzet is.

Vanuit **Milieu & Ruimte** worden bij toepassing van kernenergie in het energiesysteem (optie 2) effecten op bebouwing en landbouw voorkomen, omdat een geringer opgesteld vermogen nodig is voor wind op land. De kans op effecten op externe veiligheid differentiëren voor de twee opties. Bij de optie zonder kernenergie is er sprake van een grotere kans op effecten (als gevolg van de aantallen windturbines), maar betreft het effecten van een kleinere omvang. In optie 2 (met kernenergie) is er een kleinere kans op effecten, maar met een grote omvang. Bij toepassing kernenergie is het niet goed mogelijk deze effecten te mitigeren. In een energiesysteem zonder kernenergie is dit, door rekening te houden met mogelijke risico's bij de plaatsing van windturbines, wel mogelijk.

Daarnaast zijn de effecten van het ruimtebeslag met name afwijkend ten aanzien van landschap en ecologie. In de optie zonder kernenergie (optie 1) is er sprake van een iets groter direct ruimtebeslag als gevolg van opwek en opslag ten opzichte van de optie met kernenergie (optie 2). Bij plaatsing van 5,0 GW kerncentrales in Borssele/Sloegebied en 3,3 GW op de Maasvlakte is er, door de combinatie met aanlanding van wind op zee op die locaties, in totaal echter wel ongeveer 175 kilometer aan nieuwe bovengrondse hoogspanningsverbindingen nodig, specifiek in Zeeland, Rotterdam en West-Brabant. Zonder toepassing van kernenergie is dit ongeveer 45 kilometer. Dit vormt een belangrijk aandachtspunt bij de optie met kernenergie. Bij de toepassing van veel wind op land is er naar verwachting een grotere kans op effecten op ecologisch beschermde gebieden en soorten dan bij de toepassing van kernenergie, inclusief de realisatie van nieuwe verbindingen in het elektriciteitsnet. Voor deze structuurkeuze geldt dat de optie met kernenergie zorgt voor een kleiner ruimtebeslag van de opwek en opslag en daarmee kleinere kans op effecten op die locaties, echter een aanzienlijk groter ruimtebeslag van nieuwe elektrische infrastructuur in vergelijking met de optie zonder kernenergie. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de optie met kernenergie voorzien wordt binnen de reserveringslocaties Borssele/Sloegebied en Maasvlakte, waar ook al een aanzienlijk vermogen aanlanding windenergie op zee plaatsvindt.

Vanuit het perspectief van **Welvaart** kan geen eenduidige conclusie getrokken worden of de optie met kernenergie leidt tot hogere of lagere maatschappelijke kosten. De grote onzekerheden over de toekomstige energiekostprijzen worden gereflecteerd in de uitkomsten van drie prijsscenario's in de welvaartsanalyse. De uiteindelijke uitkomst zal dus sterk afhangen van de ontwikkelingen rondom de energiekostprijzen. Bij het gemiddelde van de prognoses van de energieprijzen vallen de maatschappelijke kosten van beide opties ongeveer even hoog uit. Bij hogere kosten voor kernenergie en lagere

[45] Ook met kerncentrales is achtervang nodig met regelbare gascentrales, voor momenten met weinig wind en zon.
[46] Dit betekent dat de kerncentrales het hele jaar door draaien.

kosten voor wind op land valt de optie met kernenergie (optie 2) duurder uit, bij lagere kosten voor kernenergie en hogere kosten voor wind op land valt de optie met kernenergie goedkoper uit.
Bij toepassing van kernenergie (optie 2) is op lokaal niveau iets minder energie-infrastructuur nodig, maar bij toepassing van kernenergie in Borssele/Sloegebied en Rotterdam (in deze hoeveelheden) zijn forse uitbreidingen van het hoogspanningsnet nodig. Daarom vallen de kosten voor nieuwe energie-infrastructuur iets hoger uit voor de optie met kernenergie. De kosten voor energieopslag vallen daarentegen weer iets lager uit voor deze optie. Beide kostenposten staan niet in verhouding tot de kosten voor energieproductie.

De externe kosten in de welvaartsanalyse zijn grotendeels kwalitatief beoordeeld. Hieronder vallen ook de nucleaire veiligheid en de eindberging van nucleair afval. Alhoewel de kans op bijvoorbeeld een kernongeval erg klein is, is het belangrijk om te benadrukken dat de mogelijke schade enorm kan zijn. Met een gevoeligheidsanalyse is geprobeerd aan te tonen hoe de interactie tussen kans en schade werkt en hoe dit invloed heeft op de uitkomst van de welvaartsanalyse. De conclusie van deze gevoeligheidsanalyse is dat de externe kosten met betrekking tot nucleaire veiligheid niet de doorslaggevende factor zijn in de welvaartsanalyse.

Vanuit het perspectief van **Systeemefficiëntie** wordt de optie met kernenergie (optie 2) beter beoordeeld op het gebied van afstemming van vraag en aanbod in de tijd. De constante productie van kernenergie sluit beter aan bij de vraag naar elektriciteit, waardoor minder opslag van elektriciteit noodzakelijk is. Daarentegen is er bij de optie met kernenergie wel meer nieuwe energie-infrastructuur nodig, waardoor deze optie minder goed wordt beoordeeld op afstemming van vraag en aanbod in de ruimte. Er zijn nieuwe hoogspanningsverbindingen nodig van Zeeland en Rotterdam naar de rest van Nederland om de lokale overschotten, door de combinatie van kerncentrales met aanlanding van windenergie op zee, af te voeren[47]. Bij de optie met kernenergie zijn minder nieuwe ondergrondse middenspanningskabels nodig om windturbines aan te sluiten, maar de investeringskosten voor deze kabels liggen naar verwachtingen een stuk lager dan de investeringskosten voor nieuwe hoogspanningsinfrastructuur bij de optie met kernenergie.

Binnen deze structuurkeuze is gekeken naar één mogelijke variant van kernenergie en één mogelijke variant zonder kernenergie. Er zijn andere varianten mogelijk met andere locaties van kerncentrales, andere type kerncentrales, andere inzet van de centrales en een andere invulling van de rest van de energiemix. Bij een andere variant kunnen de effecten op het gebied van Milieu & Ruimte, Welvaart en Systeemefficiëntie iets anders uitvallen. Alhoewel men hieruit dus eigenlijk geen algemene conclusie kan trekken over kernenergie, geeft het wel goed inzicht in de afhankelijkheden met betrekking tot deze keuze.

[47] Dit is geen algemene conclusie voor kernenergie, maar geldt specifiek voor de locaties Zeeland en Rotterdam door de combinatie van aanlanding van windenergie op zee en kernenergie. Bij plaatsing van kerncentrales op andere locaties in Nederland zijn mogelijk geen nieuwe hoogspanningsverbindingen nodig.

Conclusie
De effecten van de toepassing van kernenergie zijn afhankelijk van de precieze invulling, maar er zijn wel enkele algemene conclusies te trekken. Uit de beoordeling volgt dat de toepassing van kernenergie in de energiemix leidt tot minder direct ruimtebeslag. Wel is er door een wisselwerking tussen aanlanding windenergie op zee en plaatsing grote volumes van must-run kerncentrales bij Borssele/ Sloegebied en de Maasvlakte mogelijk nieuwe 380kV-infrastructuur nodig voor elektriciteitstransport landinwaarts. De combinatie aanlanding windenergie op zee en kernenergie zorgt namelijk lokaal voor grote overschotten van elektriciteit die afgevoerd moeten worden. Het kan voordelen bieden om kerncentrales op een andere locatie verder landinwaarts te plaatsen om zo nieuwe hoogspanningsinfrastructuur te voorkomen.

5.2.8 Structuurkeuze 8: Binnenlandse productie synthetische brandstoffen of import

In 2050 is er een grote behoefte aan synthetische brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart. Nederland kan ervoor kiezen om deze brandstoffen te importeren (optie 1) of om ze deels zelf te produceren (optie 2). In de huidige situatie worden deze brandstoffen in Nederlandse raffinaderijen geproduceerd uit geïmporteerde aardolie. Bij productie in Nederland is uitgegaan van extra windenergie op zee om waterstof te produceren en om CO_2 af te vangen uit de lucht (DAC – Direct Air Capture). Het is niet mogelijk om het gehele nationale verbruik aan synthetische brandstoffen binnenlands te produceren. Bij beide opties is het dus nodig om tenminste een gedeelte van het verbruik te importeren.

Vanuit **Milieu & Ruimte** is de kans op effecten, met name op ruimtebeslag, het grootst bij keuze voor (gedeeltelijke) eigen productie van synthetische brandstoffen (optie 2). Door zo veel als mogelijk de binnenlandse productie van synthetische brandstoffen te faciliteren, is er een aanvullend ruimtebeslag in gebieden met een hoge ruimtedruk en een al omvangrijke opgave in de energietransitie. Dit zijn de haven-industriële clusters Rotterdam en Amsterdam (NZKG). Daarnaast is extra ruimte nodig voor windparken op zee, aangezien extra windenergie nodig is om deze synthetische brandstoffen te produceren. Ook is er dan opslag van waterstof nodig in zoutcavernes, dit vergt ook extra ruimte en heeft effecten op landbouw, landschap en natuur. Bij de keuze voor volledige import van de synthetische brandstoffen komt de ruimte-lijke opgave voor de productie van deze brandstoffen in het buitenland terecht. Het ruimtebeslag in Nederland is dan kleiner, maar in de havenindustriële clusters is wel ruimte nodig voor importterminals.

Voor het thema **Welvaart** is het niet mogelijk om een eenduidige conclusie te trekken welke optie beter beoordeeld wordt. Bij (gedeeltelijke) eigen productie (optie 2) zijn er investeringskosten en operationele kosten voor de productie van synthetische kerosine en scheepsbunkers die bij import logischerwijs niet worden gemaakt. Daartegenover staat structurele, directe werkgelegenheid die kan ontstaan tijdens de operationele fase van de fabrieken voor synthetische brandstof. Daarnaast kan de exploitatie leiden tot een surplus voor de aandeelhouders die als positief welvaartseffect gerekend kan worden en kan de eigen productie bovendien leiden tot lagere prijzen voor kerosine en scheepsbunkers.

Ook voor het thema **Systeemefficiëntie** is het niet mogelijk om een eenduidige conclusie te trekken welke optie beter wordt beoordeeld. Gedeeltelijke eigen productie van synthetische brandstoffen (optie 2) kan een positieve impact hebben op de leveringszekerheid van synthetische brandstof, al blijft de import-afhankelijkheid erg groot. Wel is er bij binnenlandse productie meer energieopslag en energie-infrastructuur nodig in Nederland.

Conclusie
Een gedeelte van de binnenlandse vraag naar synthetische brandstoffen zelf produceren, leidt tot een grotere ruimtedruk in Nederland (maar een kleinere ruimtelijke opgave in het buitenland). Voor de thema's Welvaart en Systeemefficiëntie is gedeeltelijke eigen productie op sommige aspecten beter beoordeeld, maar zijn er ook aspecten waarop volledige import beter beoordeeld is. Er kan geen eenduidige conclusie getrokken worden welke optie beter is.

5.2.9 Structuurkeuze 9: Faciliteren doorvoer grondstoffen naar buitenland

Nederland kan in de toekomst, net als nu, een belangrijke rol vervullen in de import en export van grondstoffen en energie voor doorvoer van en naar het buitenland. In deze structuurkeuze wordt de import voor strikt Nederlandse vraag (optie 1) vergeleken met de effecten van het faciliteren van doorvoer van grondstoffen naar het buitenland (optie 2). Er is vanuit gegaan dat België zijn eigen energie en grondstoffen kan importeren via de havens van Antwerpen en Zeebrugge. Export van CO_2 naar Nederland is wel voorzien. Daarnaast is uitgegaan van de import van extra energie en grondstoffen om ze vervolgens door te voeren naar Duitsland, en import van CO_2 uit Duitsland voor opslag onder de Noordzee. Optie 2 heeft de Delta Rhine Corridor als basis, tussen Rotterdam en Chemelot via Venlo, met een verbinding naar Duitsland ter hoogte van Venlo of Sittard. De Delta Rhine Corridor vervoert naast waterstof, lpg en propeen van Rotterdam naar Chemelot en Duitsland, en CO_2 in tegengestelde richting. Daarnaast is een CO_2-transportleiding tussen Antwerpen en Rotterdam onderdeel van de optie faciliteren van doorvoer van grondstoffen naar het buitenland.

De doorvoer van grondstoffen naar het buitenland (optie 2) heeft geen invloed op de **systeemefficiëntie** van het toekomstige energiesysteem. De Delta Rhine Corridor en de leiding tussen Antwerpen en Rotterdam zijn losstaande activiteiten voor doorvoer richting het buitenland en hebben geen impact op de rest van het Nederlandse energiesysteem. Ook voor leveringszekerheid is er geen onderscheid: de doorvoerstroom is gecontracteerd voor het buitenland en Nederland kan daar geen aanspraak op maken. Dit is één van de factoren die ervoor zorgt dat de **welvaartseffecte**n niet overduidelijk in het voordeel van één van beide opties uitvallen.

Voor **Milieu & Ruimte** geeft het doorvoeren van grondstoffen naar het buitenland (optie 2) een aanvullend ruimtebeslag op de locaties van import en invoeding in het buisleidingennetwerk door terminals, in de structuurkeuze is dit voorzien in de haven van Rotterdam. De ruimtedruk is hier groot door bestaande industrie en een omvangrijke opgave voor het invullen van de energietransitie. Wel is er een mogelijkheid tot herontwikkeling van bestaande locaties als gevolg van de energietransitie. De kans op effecten bij Rotterdam is hierdoor groot. Er is een middelgrote kans op externe veiligheidseffecten. Als de Delta Rhine Corridor wordt gerealiseerd is er in dat geval voldoende capaciteit om de doorvoer in optie 2 mogelijk te maken zonder extra buisleidingen[48]. Hierbij wordt gebruikgemaakt van de bestaande reserveringen zoals opgenomen in de Structuurvisie Buisleidingen[49].

[48] Op het moment van schrijven, is nog onduidelijk of de externe veiligheidscontouren voor waterstof anders worden dan voor aardgas. Een discussie loopt over aanpassing van de rekenmethodiek voor waterstofleidingen (SAFETI.NL). Als daaruit blijkt dat externe veiligheidscontouren groter worden dan voor aardgas, zijn mogelijk ruimtelijke reserveringen gewenst.

[49] Uit de onderzoeken die momenteel worden uitgevoerd in het kader van de Delta Rhine Corridor blijkt dat er in de praktijk ruimtelijke knelpunten optreden binnen de gereserveerde ruimte. Hiervoor moeten passende oplossingen worden gevonden.

Conclusie
De doorvoer van grondstoffen voor het buitenland heeft geen invloed op Systeemefficiëntie of op de Welvaart. Wel zijn er effecten op Milieu & Ruimte. Er is een groter ruimtebeslag in de vorm van terminals ten opzichte van import voor eigen gebruik. Daarnaast dient er rekening gehouden te worden met externe veiligheid van deze terminals en de omgeving. Er is geen extra ruimtebeslag voor infrastructuur, de huidige reserveringen hebben voldoende capaciteit.

5.2.10 Structuurkeuze 10: Restwarmte of geothermie

Warmtenetten kunnen een groot deel van de Nederlandse gebouwvoorraad verwarmen. De belangrijkste opties voor grootschalige warmtebronnen zijn restwarmte en geothermie. Voor het transport van warmte van de bron naar afnemers is bovenregionaal warmtetransport nodig. In deze structuurkeuze is de optie bovenregionaal transport met geothermie als hoofdwarmtebron (optie 1) vergeleken met de optie restwarmte (van de industrie) als hoofdwarmtebron (optie 2). Restwarmte van elektrolysers is niet meegenomen, maar zou in de toekomst – afhankelijk van omvang, locatie, en draaiuren – een bijdrage kunnen leveren naast of in plaats van restwarmte van de industrie.

Op het gebied van **Systeemefficiëntie** is er geen wezenlijk verschil tussen beide opties. Beide opties kennen onzekerheid in leveringszekerheid. De levering van restwarmte (optie 2) is gekoppeld aan de industrie, wat onzekerheid meebrengt: de restwarmte-beschikbaarheid kan afnemen als gevolg van een energietransitie in de industrie. Geothermie (optie 1) is nog niet op grote schaal toegepast en er zijn projecten gestopt na optreden van effecten in de ondergrond. Beide bronnen dienen als basislast, dat wil zeggen dat ze continue warmte leveren voor de minimale vraag. Hierdoor is er geen verschil op het gebied van opslag en conversie: dit wordt in beide gevallen niet door de basisbron geleverd.

Restwarmte als hoofdbron (optie 2) geeft positievere **Welvaartseffecten** dan geothermie als hoofdbron (optie 1). Dit komt omdat de directe kosten van de productielocaties aanzienlijk hoger zijn voor geothermie dan voor restwarmte. Daarnaast bestaan er enkele ondergrondrisico's bij geothermie, zoals lekkage risico's en seismiciteit. Deze effecten zijn niet in gekwantificeerd, maar naar verwachting beperkt ten opzichte van directe effecten.

Ook wat betreft de effecten op **Milieu & Ruimte** onderscheiden de beide opties zich met name in opwek. Door (maximaal) geothermie (optie 1) toe te passen worden er bronnen aangeboord die bij focus op restwarmte (optie 2) niet worden ingezet. Dit betekent met name een toename in de kans op tijdelijke effecten op de directe omgeving (geluid) en op de bodem (trillingen), al zijn deze effecten goed te mitigeren bij juiste toepassing van de techniek (kleine kans op effect). De effecten als gevolg van de bovenregionale leidingen zijn onderling gering afwijkend. Indien toepassing wordt gegeven aan geothermie, zal meer transport plaatsvinden vanuit de omgeving Rotterdam regio – Den Haag – Dordrecht. In de optie met restwarmte is minder transport nodig vanuit die regio, omdat dan Breda wordt voorzien vanuit Moerdijk, en niet vanuit Dordrecht. Hiermee wordt een complexe kruising met de Biesbosch en het Hollands Diep voorkomen. Dit is ook aangewezen als Natura 2000-gebied. Hetzelfde geldt voor de leiding tussen Ede en Arnhem (kruising Natura 2000-gebied Veluwe) voor geothermie die bij restwarmte niet aanwezig is. De in plaats daarvan toegevoegde restwarmteleiding Chemelot–Maastricht doorkruist geen Natura 2000.
De effecten in het Noorden van Nederland blijven nagenoeg gelijk; in beide gevallen is er sprake van bovenregionale leidingen met soortgelijke effecten. Er is sprake van een klein onderscheid in de kans op effecten als gevolg van de aanleg en het gebruik van bovenregionale warmtetransportleidingen in de hier onderzochte opties. In de praktijk is het logischer om een combinatie van geothermie en restwarmte te

gebruiken, aangezien beide opties een bijdrage kunnen leveren aan de transitie naar een klimaatneutraal energiesysteem en beide opties hun voordelen hebben.

Conclusie
Zowel restwarmte als geothermie brengt onzekerheid mee in termen van leveringszekerheid. De keuze voor restwarmte of geothermie is deels afhankelijk van de locatie. Restwarmte kent een aantal voordelen t.o.v. geothermie. Geothermie heeft lokaal een toename in de kans op effecten op de directe omgeving (geluid) en op de bodem (trillingen). Bij restwarmte is dit niet het geval, als het gaat om bestaande installaties waarvan restwarmte ontgonnen wordt. Daarnaast zijn de directe kosten van productielocaties van geothermie aanzienlijk hoger.

5.3 Beoordeling per systeemontwikkeling

5.3.1 Inleiding

Naast de structuurkeuzes die verschillende opties geven voor het energiesysteem zijn er enkele mogelijke systeemontwikkelingen. Dit zijn geen keuzes, maar ontwikkelingen die afhankelijk zijn van externe factoren zoals de ontwikkeling van energieprijzen.

In deze paragraaf worden de drie belangrijkste mogelijke systeemontwikkelingen behandeld. Deze hebben betrekking op de soort energiedragers die gebruikt gaan worden. In het toekomstige energiesysteem zullen alle belangrijke hernieuwbare energiedragers (elektriciteit, waterstof, groengas, warmte) een rol krijgen, maar de verhouding tussen deze energiedragers is nog niet uitgekristalliseerd. De systeem-ontwikkelingen schetsen drie mogelijke invullingen van de energiemix.

Beoordeling systeemontwikkelingen en abstractieniveau
Deze systeemontwikkelingen vallen binnen de hoeken van het speelveld van de zeven scenario's.
Ze vallen echter niet precies samen met een van de scenario's en er zijn binnen de systeemontwikkelingen nog enkele onzekerheden, waardoor niet voldoende gegevens beschikbaar zijn voor een volledige beoordeling. Daarom wordt een globaal beeld geschetst van effecten op Milieu & Ruimte en Systeemefficiëntie. Een welvaartsanalyse is niet mogelijk. De afweging van de maatschappelijke kosten van de drie systeemontwikkelingen is afhankelijk van de energieprijzen.

De uitwerking van de systeemontwikkeling geeft inzicht in de mogelijke effecten van verschillende invullingen van de energiemix, maar is niet concreet genoeg om als input te dienen voor het aanwijzen van ontwikkelrichtingen binnen het PEH.

5.3.2 Systeemontwikkeling 1: Maximale elektrificatie

Deze systeemontwikkeling kijkt naar de situatie waar ingezet wordt op maximale elektrificatie. Om aan de extra elektriciteitsvraag bij maximale elektrificatie te voldoen, is extra elektriciteitsproductie noodzakelijk. Deze productie kan ingevuld worden met extra windturbines en zonnepanelen, maar ook met extra inzet van regelbare centrales.

In beide gevallen zijn vermoedelijk extra regelbare centrales nodig om in de hogere piekvraag te voorzien. Dit leidt mogelijk tot extra effecten op het gebied van Milieu & Ruimte door extra ruimtebeslag van nieuwe centrales. Het maximaal inzetten op de elektrificatie van het energiesysteem resulteert in een grotere vraag naar hernieuwbare opwek op land en regelbare centrales. Vanuit Milieu & Ruimte zijn bij meer

hernieuwbare opwek grote effecten op landschap en natuur te verwachten. Bij regelbare centrales is er voornamelijk ruimtegebruik bij de Barro-locaties, die mogelijk uitgebreid moeten worden. Als dit het geval is, heeft dit grote effecten op landbouw, natuur en woonkernen in de nabijheid. De kans op effecten op milieu en ruimte door ontwikkelingen bij de elektriciteitsinfrastructuur is niet goed in te schatten omdat niet duidelijk is waar vraag en aanbod zullen toe of afnemen. Als er niet gekozen wordt om opwek zo dicht mogelijk bij de vraag te plaatsen, is het aannemelijk dat er nieuwe verbindingen nodig zullen zijn. De verwachting is dat dit in Noord-Holland, Zuid-Holland, Zeeland en Noord-Brabant tot nieuwe verbindingen zal leiden. Dit heeft een grote kans op effecten op landschap, natuur en bebouwing.

5.3.3 Systeemontwikkeling 2: Maximaal gebruik waterstof

Deze systeemontwikkeling kijkt naar de situatie waar ingezet wordt op maximaal gebruik van waterstof. Bij de productie van waterstof uit elektriciteit vinden conversieverliezen plaats. Daardoor ligt de primaire energievraag bij maximaal gebruik van waterstof naar verwachting hoger dan bij maximale elektrificatie. Dat betekent dat er meer opwek van hernieuwbare energie plaats moet vinden, in Nederland of door import uit het buitenland. Als dit wordt gedaan met behulp van aanvullende binnenlandse productie is er sprake van een aanzienlijk extra ruimtebeslag ten opzichte van import door opwek van elektriciteit (wind en zon) en productie van waterstof (elektrolysers) en bijbehorende effecten dan bij volledige elektrificatie. Bij clustering van de opwek heeft dit grote effecten op natuur en landschap op lokale schaal. Bij spreiding heeft dit grote effecten op natuur en landschap op nationale schaal. Daarnaast hebben elektrolysers nog ruimtebeslag op de locaties waar wind op zee aan land komt of bij locaties waar waterstofvraag is.
Bij het laatste zijn er mogelijk nieuwe bovengrondse hoogspanningsverbindingen nodig met effecten op woonkernen, natuur en landschap. Voor transportleidingen tussen aanbod en vraag geldt dat er bij maximaal gebruik waterstof minder effecten zijn dan bij maximale elektrificatie.

Bij import van waterstof kan een groot deel van de waterstof direct gebruikt worden en is er in principe niet meer waterstofopslag noodzakelijk. Wel is er tijdelijke opslag van waterstof nodig. Hiervoor zijn naast importterminals in havens ook opslagterminals nodig. Omdat het gaat over tijdelijke opslag, is er minder seizoensopslag in bijvoorbeeld cavernes nodig bij import van waterstof dan bij binnenlandse productie van waterstof en bij maximale elektrificatie. De terminals zijn voorzien bij de havens, waar de ruimtedruk hoog is. Als er meer waterstof geproduceerd wordt uit hernieuwbare bronnen in Nederland is er wel meer waterstofopslag nodig in de vorm van seizoensopslag.

Inzet op maximaal gebruik van waterstof zorgt, ten opzichte van maximale elektrificatie, voor een lagere belasting op het elektriciteitsnet. Door een grotere vraag naar waterstof kunnen er bij aanlandingslocaties en aftakkingen van het waterstofnetwerk knelpunten ontstaan. Hiervoor wordt geen extra ruimtebeslag verwacht.

5.3.4 Systeemontwikkeling 3: Maximaal gebruik groengas/methaan

Deze systeemontwikkeling kijkt naar de situatie waar ingezet wordt op maximaal gebruik van groengas. Productie van methaan (of groengas) uit biomassa reststromen, kan in 2050 verspreid over Nederland plaatsvinden. Het is nu niet mogelijk om deze locaties en het ruimtebeslag daarvan in te schatten. Om in een maximale vraag naar groengas te voorzien, is Nederlandse productie niet voldoende. Methaan kan dan geïmporteerd worden via leidingen of via lng-terminals. Daarvoor zijn mogelijk lng-terminals nodig in de havens. Dit levert ruimtelijke knelpunten op binnen de havengebieden die al een grote ruimtelijke

opgave vanuit de energietransitie hebben. Mogelijke uitbreiding van deze gebieden heeft grote gevolgen voor nabijgelegen landbouw, natuur en woonkernen.

De inzet op maximaal gebruik van methaan heeft waarschijnlijk geen groot effect op de totale opslagbehoefte als methaan in plaats van waterstof toegepast wordt. De huidige gasopslagen zijn meer dan voldoende voor opslag van methaan. Wel moet er een verdeling gemaakt worden tussen opslagen voor waterstof en methaan als deze gassen beide een grote rol spelen in 2050.

Naast methaan is er in 2050 ook vraag naar waterstof, waardoor het bestaande net voor beide gassen gebruikt wordt. Hiervoor wordt geen aanvullend ruimtebeslag verwacht in het hoofdtransportleidingennet om deze dubbele functie te vervullen. Mogelijk wel in aanvullende aansluitleidingen bij inzet van methaan náást waterstof in de gebouwde omgeving.

5.4 Conclusies structuurkeuzes en systeemontwikkelingen

De ontwikkelingen rondom windenergie op zee hebben een grote impact op de energiehoofdstructuur. Het is daarom belangrijk om zo snel mogelijk een totaalbeeld te hebben voor de ontwikkeling van windenergie op zee. Hoeveel windenergie op zee wil je in totaal ontwikkelen? Welk deel landt elektrisch aan en welk deel in de vorm van waterstof en welke locaties zijn hiervoor het meest logisch (elektrisch en/of waterstof op een locatie)? Waar laat je de windenergie aanlanden? Waar ga je de windenergie voor gebruiken, wil je hier zelf synthetische brandstoffen van maken, wil je windenergie transporteren naar Duitsland? De bevindingen van verschillende structuurkeuzes geven inzicht voor deze afwegingen, maar uiteindelijk zijn dit politieke/bestuurlijke keuzes die gemaakt moeten worden. Deze afwegingen worden voor een deel nader onderzocht in het Programma VAWOZ 2031-2040.

De ontwikkelingen van windenergie op zee moeten in samenhang bekeken worden met ontwikkelingen van overige productiebronnen, zoals kernenergie en hernieuwbare opwek op land. De (directe) vraag naar elektriciteit stijgt fors richting 2050, maar de potentie van al deze bronnen samen ligt een stuk hoger dan de verwachte elektriciteitsvraag. Daarom moeten keuzes gemaakt worden over welk deel van het potentieel van elke bron in de toekomst benut moet worden, of wat je met de overschotten aan elektriciteit gaat doen als het hele potentieel van deze bronnen al benut wordt (export, productie waterstof en synthetische brandstoffen). Daarnaast moet de ontwikkeling van verschillende bronnen op regionaal niveau in samenhang bekeken worden met de regionale elektriciteitsvraag. Anders kan de situatie ontstaan dat in 2050 regionaal grote overschotten van elektriciteit ontstaan die leiden tot uitbreidingen van hoogspanningsinfrastructuur met een forse ruimtelijke impact, die voorkomen kunnen worden bij efficiëntere keuzes voor productielocaties (met betere koppeling tussen vraag en aanbod van energie).

De ontwikkelingen van windenergie op zee dienen ook in samenhang gezien worden met de ontwikkeling van elektrolysers. Het plaatsen van elektrolysers bij aanlandingspunten van windenergie op zee wordt beter beoordeeld, aangezien dan minder nieuwe energie-infrastructuur noodzakelijk is om elektriciteit bij de elektrolysers te krijgen (zie paragraaf 5.2.4). En de hoeveelheid elektrolysers die wenselijk is op een locatie is afhankelijk van de hoeveelheid windenergie op zee die aanlandt. Bij meer elektrische aanlanding van windenergie op zee op een bepaalde locatie is het wenselijk om daar ook meer elektrolysers te plaatsen, wat extra ruimtebeslag en bijbehorende effecten oplevert.

Grootschalige elektrolysers kunnen potentieel veel restwarmte produceren, dat mogelijk gebruikt kan worden voor de verwarming van de gebouwde omgeving (mogelijk deels ter vervanging van afnemende

restwarmte van de industrie). Het is wenselijk om de ontwikkeling van elektrolysers daarom ook in samenhang met de ontwikkeling van warmte-infrastructuur te bekijken.

Een groot deel van de structuurkeuzes kunnen een ruimtelijke neerslag hebben op de Barro-locaties, en dan met name op de Barro-locaties aan de kust. De beschikbare ruimte op deze locaties is beperkt en het is waarschijnlijk niet haalbaar om alle opties ruimtelijk te faciliteren. Daarom moeten per locatie keuzes gemaakt worden. Als Barro-locaties uitgebreid moeten worden heeft dit grote effecten op nabijgelegen landbouw, natuur en woonkernen.

5.5 Resultaten Gevoeligheidsanalyse

De belangrijkste bevindingen uit de gevoeligheidsanalyse zijn:

- Mogelijke extra aanlanding van wind op zee in Noord-Brabant, bij Moerdijk en Geertruidenberg, heeft impact op de benodigde ruimte op deze Barro-locaties. Meer aanlanding van windenergie op zee op deze locaties zorgt ervoor dat er op deze locatie fors meer ruimte nodig is dan volgt uit de analyses van de IEA. Bij Moerdijk is hiervoor een nieuw 380kV-station nodig. Dit is opgenomen als MIEK-project. De additionele ruimtevraag bij Moerdijk en Geertruidenberg levert ruimtelijke knelpunten op voor de inpassing in dit gebied voor Milieu & Ruimte waarbij de beschikbaarheid van ruimte het grootste aandachtspunt is. Meer aanlanding van wind op zee in Noord-Brabant heeft ook impact op de belasting op hoogspanningsverbindingen, maar de exacte effecten op de benodigde ruimte voor hoogspanningsverbindingen is niet bekend.
- De elektriciteitsvraag van de industrie ligt in de gehanteerde scenario's lager dan de prognoses van de CES 2.0 voor de clusters Schelde-Deltaregio, Noordzeekanaalgebied en Noord-Nederland. Dit heeft mogelijk impact op de benodigde ruimte voor nieuwe velden bij 380kV-stations in die gebieden die nodig zijn voor het aansluiten van de industrie. Daarnaast heeft de hogere elektriciteitsvraag uit de CES 2.0 impact op de hoeveelheid windenergie op zee die in de clusters elektrisch kan aanlanden voordat uitbreidingen aan de achterliggende hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk zijn.
- De vraag naar en import van waterstof in de clusters Schelde-Deltaregio en Noordzeekanaalgebied worden mogelijk ook onderschat in de scenario's van de IEA. Mogelijk is boven op de uitkomsten van de IEA hierdoor extra ruimte nodig voor een importterminal voor waterstof. Hier kan mogelijk vrijkomende ruimte in het gebied door uitfasering van kolen, olie en aardgas gebruikt worden. Daarnaast is mogelijk extra ruimte nodig voor een uitbreiding van aansluitleidingen richting de doorvoerleidingen van het landelijke waterstofnetwerk. Dit heeft geen impact op de benodigde ruimte voor het landelijke waterstofnetwerk zelf, aangezien deze voldoende capaciteit heeft.
- Het aantal vollasturen voor windmolens op land en op zee is mogelijk onderschat in de scenario's van de IEA. De effecten van een hoger vollasturen van windturbines op de benodigde ruimte voor energie-infrastructuur is afhankelijk van de specifieke uitwerking. Mogelijk wordt de benodigde ruimte voor energie-infrastructuur iets overschat doordat in de analyses van deze IEA uitgegaan wordt van een laag aantal vollasturen.
- Gasunie heeft een aantal trajecten aangegeven waar mogelijk knelpunten kunnen optreden, die niet direct uit de scenario's volgen. Het gaat overwegend om nieuwe aansluitingen voor elektrolysers en regelbare centrales op door Gasunie geïdentificeerde aansluitpunten. De aansluitleidingen zijn korte leidingen (in de meeste gevallen minder dan 1,5 km) die de elektrolysers en centrales met het landelijke waterstofnetwerk verbinden. Als de nieuwe aansluitleidingen niet in een bestaande buisleidingstrook ligt is extra ruimte nodig voor de aanleg van deze buisleidingen.
- De modellering van de inzet van flexibiliteitsbronnen in de nieuwe scenario's van II3050 kan mogelijk een significante impact op de benodigde ruimte voor energie-infrastructuur hebben, maar het is nog

niet duidelijk hoe deze wijzigingen uit gaan pakken. Daarom kan geen inschatting gemaakt worden van de impact hiervan op de resultaten van de IEA.

- Vanuit Target Grid zijn ook inschattingen gemaakt van de benodigde hoogspanningsinfrastructuur in de toekomst. De bevindingen komen grotendeels overeen, maar er zijn enkele verschillen tussen de bevingen van Target Grid en de uitkomsten uit de IEA. Het belangrijkste verschil is dat in Target Grid benoemd wordt dat knelpunten aan de hoogspanningsinfrastructuur ontstaan tussen Diemen en de Maasvlakte, wat niet naar voren komt in de IEA. Welke uitbreidingen nodig zijn tussen Diemen en de Maasvlakte is niet verder onderzocht in Target Grid. Daarom kan hiervoor geen volledige beoordeling Milieu & Ruimte gedaan worden. In het gebied tussen Diemen en de Maasvlakte kunnen mogelijk knelpunten optreden door veel bebouwing, kruisingen bestaande tracés, ruimtebeslag, en kruising NNN, Natura 2000 en cultuurhistorisch waardevolle gebieden. Andere ontwikkelingen die naar voren komen in Target Grid, maar niet in de IEA, zijn een nieuwe interconnectie bij Terneuzen en een verzwaring van de interconnectie tussen Eemshaven en Emden. Ook deze zijn niet concreet genoeg voor een beoordeling op Milieu en Ruimte.

5.6 Uitvoerbaarheid & Doelbereik

5.6.1 Uitvoerbaarheid: plaatsen ontwikkelingen in de tijd (periode 2030-2040)

Op basis van de doorrekening van zeven scenario's voor 2050 voor deze IEA, is een inschatting gemaakt welke ruimte nodig is voor uitbreidingen van de nationale energie-infrastructuur tussen 2030 en 2050. Twintig jaar is een lange periode en daarom is het wenselijk om een beeld te krijgen welke ruimte voor uitbreidingen van energie-infrastructuur naar verwachting als eerste nodig is in de periode tussen 2030 en 2040 en welke ruimte pas na 2040 nodig is. Hier is een inschatting van gemaakt door de oorzaken van benodigde uitbreidingen te vergelijken met de tijdlijn van verwachte ontwikkelingen, zoals de uitrol van windenergie op zee. Er wordt ingegaan op de tijdlijn van de ontwikkelingen van elektriciteit, waterstof en overige buisleidingen. Een uitgebreide omschrijving hiervan is te vinden in Bijlage XIV.

De belangrijkste conclusies zijn:

- De belangrijkste ontwikkelingen die impact hebben op de benodigde ruimte voor het hoogspanningsnet zijn de uitrol van windenergie op zee, het plaatsen van kerncentrales en elektrificatie van de energie-vraag.
- Tussen 2030 en 2040 zal naar verwachting extra windenergie op zee elektrisch aanlanden aan de kust. Daarmee gaan de uitkomsten van structuurkeuze 2 (paragraaf 2.7.2) spelen in deze periode.
- Bij extra elektrische aanlanding van windenergie op zee na 2040 kan diepe aanlanding een optie worden (structuurkeuze 1, zie paragraaf 2.7.1).
- De ontwikkelingen van de nationale energie-infrastructuur tot 2040 en vooral tussen 2040 en 2050 zijn in grote mate afhankelijk van de keuzes waarvoor de extra windenergie op zee gebruikt gaat worden en als gevolg daarvan welk deel hiervan als elektriciteit en welk deel als waterstof aan land wordt gebracht.
- Bij het plaatsen van in totaal 8,3 GW kerncentrales in Borssele en op de Maasvlakte is mogelijk ruimte nodig voor nieuwe hoogspanningsverbindingen vanaf Zeeland en Rotterdam richting Noord-Brabant Structuurkeuze 7, zie paragraaf 2.7.7. De twee geplande kerncentrales in Borssele worden naar verwachting in de periode 2030-2040 gerealiseerd[50].

[50] Rijksoverheid, 2023; Kernenergie in Nederland.

- Er zijn nog geen concrete doelstellingen voor elektrificatie van de energievraag richting 2040. Maar het is de verwachting dat de elektriciteitsvraag snel zal toenemen tussen 2030 en 2040 omdat elektrificatie een belangrijke rol speelt bij het halen van de klimaatdoelen (55% reductie van uitstoot broeikasgassen in 2030 en 70% in 2035) en dat de elektriciteitsvraag in 2040 daarmee al een stuk hoger ligt dan in 2030. Voor een efficiënt energiesysteem is het belangrijk dat de toename van de elektriciteitsvraag hand in hand gaat met de toename van de productie van elektriciteit met zon, wind (op land en op zee) en mogelijk kernenergie, inclusief regelbare centrales.
- Als grote industriële bedrijven elektrificeren, kunnen deze een directe aansluiting op het 380kV-net nodig hebben. Hiervoor zijn extra velden bij hoogspanningsstations noodzakelijk. Elektrificatie van de energievraag van andere sectoren zorgt er niet direct voor dat nieuwe hoogspanningsinfrastructuur nodig is (wel extra infrastructuur op regionale schaal). Welke elektriciteitsinfrastructuur verder nodig is voor elektrificatie van de energievraag, hangt af van hoe deze extra elektriciteitsvraag ingevuld wordt.
- Richting 2040 zullen bestaande regelbare centrales omgebouwd worden naar waterstof of gebruik gaan maken van groengas. Daarom zijn al richting 2040 aanpassingen aan de aansluitleidingen vanaf het landelijke waterstofnet richting deze centrales nodig.
- Voor 2040 zijn ook al elektrolysers nodig. De locaties van grote clusters van elektrolysers volgen waar grote hoeveelheden elektriciteit beschikbaar komt. Dat is met name bij aanlandingslocaties van wind-energie op zee. Het tijdig realiseren van elektrolysers op aanlandingslocaties van windenergie op zee is nodig om verzwaringen aan hoogspanningsinfrastructuur te voorkomen. Voor de realisatie van groot-schalige elektrolysers zijn al richting 2040 aanpassingen aan de aansluitleidingen vanaf het landelijke waterstofnet richting deze elektrolysers nodig. Mogelijk zijn richting 2040 ook nieuwe aansluitleidingen noodzakelijk.
- Tussen 2030 en 2040 is het gereedmaken van één of meerdere huidige zoutcavernes in Zuidwending en bijbehorende infrastructuur voor opslag van waterstof naar verwachting voldoende. In 2030 is de behoefte aan waterstofopslag beperkt (tot 0,5 TWh in één tot vier zoutcavernes) (TNO, 2021). Wanneer waterstof grootschalig geproduceerd, geïmporteerd en gebruikt wordt, neemt de vraag naar opslag van waterstof toe. Dit is naar verwachting het geval tussen 2040 en 2050.
- Wanneer waterstof en methaan (tijdelijk) naast elkaar gebruikt worden, kan het nodig zijn om tijdelijk parallelle infrastructuur (buisleidingen) aan te leggen.
- Voor de grondstofleidingen springt vooral de Delta Rhine Corridor in het oog. De ambitie is om de eerste leidingen al voor 2030 aangelegd te hebben. Na 2030 ligt verdere uitbreiding in het verschiet als ervoor wordt gekozen om internationale transportstromen te faciliteren. In dat geval wordt de Delta Rhine Corridor na 2030 (maar voor 2040) uitgebreid met een tweede CO_2-leiding, een tweede waterstofleiding en leidingen voor (synthetische) kerosine, methanol en ammoniak.
- Bij sterke groei van CO_2-afvang en opslag (CCS) in de chemieclusters van Zeeland en Antwerpen is er na 2030 mogelijk behoefte aan een buisleiding voor CO_2 richting Rotterdam. Deze zal aangelegd worden voor 2040, omdat CCS na 2040 juist weer afgebouwd wordt ten gunste van duurzame alternatieven.
- Bij sterke groei van de luchtvaart is een uitbreiding nodig van buisleidingen voor kerosine.
  De verwachting is dat dit pas na 2040 gaat spelen en enkel bij sterke groei van de luchtvaart op kerosine.

5.6.2 Doelbereik: invulling drie afwegingsprincipes NOVI

PEH is een uitwerking van de NOVI en daarom is beoordeeld in welke mate de drie afwegingsprincipes van de NOVI ingevuld kunnen worden bij de geschetste ontwikkelingen van de energie-infrastructuur. Per afwegingsprincipe is dit hieronder uitgewerkt.

Deze drie principes zijn:
1. Combinaties van functies gaat voor enkelvoudige functies.
2. Kenmerken en identiteit van een gebied staan centraal.
3. Afwentelen wordt voorkomen.

Combinaties van functies gaan voor enkelvoudige functies

In de beoordeling van Milieu & Ruimte is meervoudig ruimtegebruik meegenomen als criterium. Hierbij is te zien dat een aantal functies niet goed gecombineerd kan worden, bijvoorbeeld nieuwe tracés van bovengrondse hoogspanningsverbindingen met landschap en natuur. Een aantal functies kan wel goed gecombineerd worden met onderdelen van de energie-infrastructuur, bijvoorbeeld in de industriegebieden (met daarin de Barro-locaties). De totale opgave voor de energie-infrastructuur in 2050 is tegelijkertijd van dusdanige omvang dat er in veel gebieden (te) weinig ruimte is. Dit vraagt om scherpe keuzes in aantal gebieden plus herontwikkeling (uitfaseren fossiel) goed te benutten. Concreet betekent dit het maken van keuzes om de opgave voor extra infrastructuur zo klein mogelijk te houden. Dit kan door het slim combineren en benutten van locaties voor aanlanding van wind op zee, (nieuwe) hoogspanningsstations en elektrolysers. Hier wordt in paragraaf 6.5 nader op ingegaan.

Kenmerken en identiteit van een gebied staan centraal.

In de beoordeling van Milieu & Ruimte zijn de kenmerken van de gebieden meegenomen en deze komen tot uiting in de verschillende milieuaspecten en de randvoorwaarden en aandachtspunten per gebied. Zo stelt een dichtbebouwde stedelijke omgeving andere randvoorwaarden dan een landelijke omgeving met natuurgebieden. Tegelijkertijd is bij de ontwikkeling van nieuwe infrastructuur (verbindingen en punt-infrastructuur) het aantal vrijheidsgraden beperkt. De punten van energievraag en van aanbod/opwek zijn veelal een gegeven en liggen vast. Ook zal nieuwe energie-infrastructuur aansluiten op bestaande netwerken. In de tracering kan wel zoveel mogelijk rekening gehouden worden met de aanwezige kenmerken. In de verschillende aandachtspunten per gebied (paragraaf 6.3) komt dit nader aan de orde.

Afwentelen wordt voorkomen

Dit heeft zowel betrekking op afwentelen in tijd (op toekomstige generaties) als plaats. Met betrekking tot afwentelen naar plaats binnen Nederland blijkt uit de Milieu & Ruimte-analyses dat een aantal gebieden veel zwaarder belast wordt. Deels wordt dit veroorzaakt doordat op deze locaties vraag en aanbod samen-komen (bijvoorbeeld in Noord-Holland) en deels komt dit door de ligging; aanlanding van wind op zee ligt vanuit geografisch perspectief nu eenmaal meer voor de hand aan de kust dan in Gelderland. Aan de ander kant hebben ook bepaalde structuurkeuzes invloed: Clustering op enkele locaties biedt voordelen op landelijke schaal, maar leidt lokaal wel tot grotere effecten dan spreiding. Door slimme keuzes te maken in de locaties voor opwek, aanlanding en afname kan de noodzaak tot het realiseren van extra infrastructuur zoveel mogelijk worden voorkomen.

Daarnaast leiden sommige keuzes mogelijk tot afwenteling naar plaatsen buiten Nederland. In de opties van structuurkeuzes (en daarachterliggende scenario's) met een grotere import van energie, vinden de effecten van de opwek van deze geïmporteerde energie niet in Nederland plaats. Bij het maken van keuzes voor meer of minder import van energie is het van belang hier rekening mee te houden.

Tot slot moet voorkomen worden dat er sprake is van afwenteling in de tijd. Zoals geschetst in de conclusies van de structuurkeuzes is het van belang om tijdig de ontwikkeling van verschillende bronnen op regionaal niveau in samenhang te bekijken met de regionale elektriciteitsvraag. Anders kan de situatie ontstaan dat in 2050 regionaal grote overschotten van elektriciteit ontstaan die leiden tot uitbreidingen van hoogspanningsinfrastructuur met een forse ruimtelijke impact, die voorkomen kunnen worden bij efficiëntere keuzes voor productielocaties (met betere koppeling tussen vraag en aanbod van energie). Met andere woorden: het niet tijdig maken van keuzes en niet actief sturen, leidt tot risico's op afwenteling in de tijd.

6 Conclusies en afwegingen

6.1 Inleiding: Ruimtebehoefte energiesysteem

In dit hoofdstuk zijn de conclusies opgenomen die volgen uit de IEA/PlanMER. Er worden dwarsverbanden gelegd tussen de verschillende beoordeelde thema's en onderdelen van het energiesysteem. Er wordt vanuit een nationaal perspectief en voor een aantal gebieden vanuit gebiedsperspectief (gebiedsanalyses) gekeken naar de grote lijnen die volgen uit de beoordeling van robuuste ontwikkelingen en structuur- en systeemkeuzes. Naast conclusies zijn ook overwegingen voor PEH opgenomen.

Uitgaande van dat niemand exact weet op welke wijze de energievraag en inzet van energiebronnen zich ontwikkelt, zijn zeven energiescenario's gebruikt om de mogelijke ontwikkelingen van de energie-infrastructuur te verkennen. De zeven scenario's bevatten de extremen van de energievraag naar verschillende energiedragers (elektriciteit, gas, warmte) en voor het energieaanbod een diverse mix aan energiebronnen (zon, wind, biomassa, geothermie, restwarmte, kernenergie) in omvang en soort, lokaal tot en met import.

De volgende onderdelen van de nationale energie-infrastructuur zijn onder de energiehoofdstructuur geschaard en meegenomen in deze IEA:

- hoogspanningsverbindingen (bovengronds en ondergronds);
- buisleidingen (ondergronds);
- Puntinfrastructuur (hoogspanningsstations, regelbare centrales, elektrolysers, opslag waterstof en batterijen).

De aanlanding van wind op zee valt zowel onder hoogspanningsverbindingen, buisleidingen als punt-infrastructuur.

Een CO_2-vrij energiesysteem vergt meer ruimte dan een energiesysteem gebaseerd op fossiele brandstoffen. Deze ruimtevraag is (nog) onvoldoende gewaarborgd in Nederland. Het doel van de analyse was te bepalen hoeveel ruimte op welke locatie nodig is voor de energie-infrastructuur benodigd voor een CO_2-vrij systeem dat vooral gebaseerd is op hernieuwbare energiebronnen. Daarbij zijn ook de grondstoffen beschouwd die via buisleidingen naar de afnemers (zowel binnen Nederland als naar België en Duitsland) worden getransporteerd. Ruimtelijke reserveringen voor energie-infrastructuur geven de vrijheid aan overheid, netbeheerders en andere partijen om het energiesysteem optimaal aan te leggen.
Het betekent niet per se dat de gereserveerde ruimte gebruikt moet gaan worden, dat hangt af van de werkelijke groei van de energievraag en productie van elektriciteit, warmte en gassen.

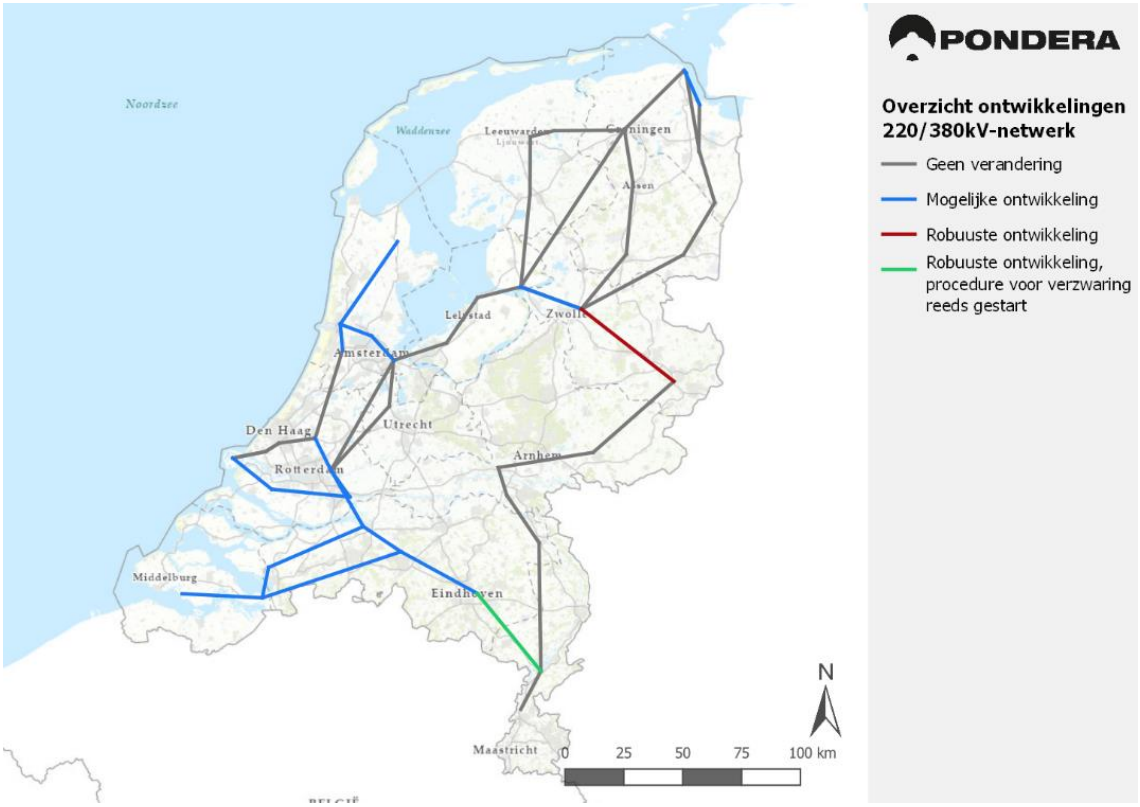
De analyse van de zeven scenario's met als basis de bestaande en nog te realiseren energie-infrastructuur (IP2022) laat zien dat er een aantal locaties is waar de behoefte aan infrastructuur (veel) groter is dan de nu aanwezige en geplande infrastructuur. Er is daarbij een onderscheid aangebracht tussen 'robuuste' knelpunten die in bijna alle scenario's optreden en knelpunten die alleen ontstaan in specifieke scenario's (opgenomen in structuurkeuzes en systeemontwikkelingen). De volgende structuurkeuzes zijn geanalyseerd:

- aanlanding windenergie op zee, kust of diep (bij Maasbracht en/of Diemen);
- aanlanding windenergie op zee, geconcentreerd of verspreid;
- locaties hernieuwbare opwek op land, spreiding of clustering;
- locaties clusters van elektrolysers;

- spreiding of clustering van regelbare centrales;
- waterstofopslag in zoutcavernes of lege gasvelden;
- toepassing kernenergie;
- binnenlandse productie synthetische brandstoffen of import;
- faciliteren doorvoer grondstoffen naar het buitenland;
- geothermie of restwarmte.

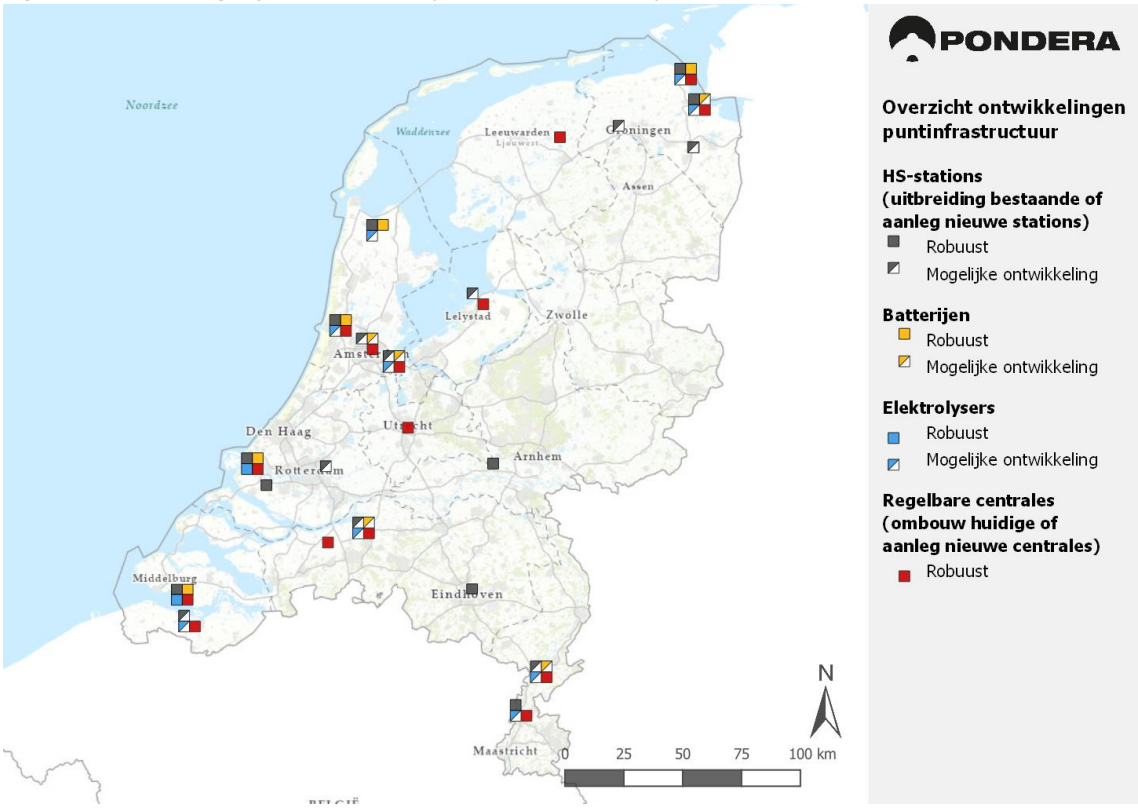
Voor de knelpunten is gezocht naar mogelijkheden om deze op te lossen (de 'ontwikkelingen') met daarbij een beoordeling op milieu- en ruimtelijke effecten. Randvoorwaarde hierbij is een efficiënt en betrouwbaar energiesysteem doorgerekend door de netbeheerders. In volgende figuren is een overzicht van alle ontwikkelingen (verbindingen, buisleidingen en puntinfrastructuur) opgenomen. Daarbij zijn de 'robuuste' ontwikkelingen de oplossingen die in alle scenario's nodig zijn en de 'mogelijke' ontwikkelingen de oplossingen die alleen in specifieke scenario's nodig zijn. De robuuste ontwikkeling voor een nieuw circuit tussen Eindhoven en Maasbracht is al opgenomen in het nieuwe Investeringsplan van TenneT, het IP2022.

Figuur 6.1 Ontwikkelingen verbindingen (robuust en niet-robuust)



Figuur 6.2 Ontwikkelingen buisleidingen (robuust en niet-robuust)

Figuur 6.3 Ontwikkelingen puntinfrastructuur (robuust en niet-robuust)



Voor de structuurkeuzes is tenslotte in een welvaartsanalyse ook gekeken naar de maatschappelijke kosten/baten van die structuurkeuze en zijn de effecten op systeemefficiëntie beoordeeld.

Combinaties van structuurkeuzes
In de analyse van de mogelijke toekomstbeelden van het energiesysteem zijn robuuste ontwikkelingen geschetst en structuurkeuzes beoordeeld. De structuurkeuzes zijn afzonderlijk beoordeeld, maar het is natuurlijk zeer goed mogelijk dat meerdere structuurkeuzes tegelijk plaatsvinden. Dat geldt bijvoorbeeld voor de keuze voor kernenergie met tegelijkertijd diepe aanlanding van elektriciteit uit wind op zee naar Maasbracht/Graetheide. Maar ook bijvoorbeeld clustering van grote elektrolysers en clustering van hernieuwbare opwek op land. De inschatting is dat de belangrijkste effecten in beeld zijn gebracht per structuurkeuze, maar zodra er helderheid is over deze keuzes zal in een volgend PEH de combinatie van effecten beoordeeld moeten worden.

6.2 Conclusies belangrijkste ontwikkelingen

6.2.1 Benodigde ruimte voor energie-infrastructuur door ontwikkeling elektriciteitsvraag en -productie en opslag

In alle verkende scenario's is een sterke groei van het elektriciteitsgebruik te zien (Tabel 6.1).
Dit is plausibel omdat de kostprijs van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen relatief de goed-koopste vorm van energie wordt in het CO_2-vrije energiesysteem en elektriciteit in de meeste gevallen zeer efficiënt kan worden gebruikt. Dit komt door weinig verliezen door hoge conversierendementen en doordat elektrische installaties weinig stilstandsverliezen hebben.

Tabel 6.1 Energievraag en -vermogens van de scenario's

2050	Nederland Energieland				(zeer) Sterke Knopen		
	Regionale Sturing	Nationale Sturing	Europese Sturing	Internationale Sturing	Nationale sturing	Europese sturing	Kernenergie
Totale energievraag	**1.181 PJ**	**1.319 PJ**	**1.647 PJ**	**1.735 PJ**	**1.319 PJ**	**1.647 PJ**	**1.647 PJ**
Elektriciteitsvraag	690 PJ	764 PJ	863 PJ	847 PJ	764 PJ	863 PJ	863 PJ
Waterstofvraag	121 PJ	266 PJ	421 PJ	494 PJ	266 PJ	421 PJ	421 PJ
Windenergie op zee	43 GW	72 GW	42 GW	38 GW	72 GW	42 GW	42 GW
Wind op land	20 GW	20 GW	10 GW	10 GW	20 GW	10 GW	0 GW
Zon op dak	59 GW	49 GW	23 GW	18 GW	49 GW	23 GW	58 GW
Zon op veld	66 GW	57 GW	34 GW	34 GW	57 GW	34 GW	0 GW
Elektrolyse	42 GW	51 GW	19 GW	16 GW	51 GW	19 GW	18 GW
Batterijen	54 GW	53 GW	33 GW	29 GW	53 GW	33 GW	27 GW
Import	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW
Opslag H_2	36 TWh	37 TWh	10 TWh	47 TWh	37 TWh	10 TWh	12 TWh
Opslag methaan	24 TWh	14 TWh	55 TWh	15 TWh	14 TWh	55 TWh	45 TWh
Grote centrales	15 GWe	17 GWe	17 GWe	16 GWe	17 GWe	17 GWe	12 GWe
Regelbare centrales	18 GWe	18 GWe	19 GWe	18 GWe	18 GWe	19 GWe	16 GWe

De elektriciteitsvraag varieert van 690-850 PJ (200-250 TWh) per jaar. Waarbij uit recente studies blijkt dat al in 2030 een elektriciteitsvraag van 150 TWh + 50 TWh waterstofproductie wordt verwacht (TNO, 2021). Allereerst is verkend welke onderdelen van het energiesysteem met grote mate van zekerheid nodig zijn om aan de energievraag te kunnen voldoen. Hierbij gaat het om alle soorten energievraag, inclusief het gebruik van energiedragers als grondstof. De elektriciteitsvraag neemt zowel toe in alle stedelijke gebieden (elektrificatie van de warmtevraag, elektrisch vervoer) als op bedrijventerreinen en in de industriële clusters. De grootste vraaggebieden staan in Figuur 6.4.

Figuur 6.4 Grootste vraaggebieden elektriciteit

Doordat alle EU-landen hun energiebronnen maximaal moeten ontwikkelen (RePowerEU, 2022)[51] en het besluit van de huidige Nederlandse regeringscoalitie om toe te werken naar 70 GW windenergie op zee (september 2022), neemt het ruimtegebruik om deze hoeveelheden windenergie aan land te brengen fors toe. Deze recente ontwikkeling is in lijn met het verkende scenario Nationale Sturing, waarbij wel van belang is hoe, waar en in welke vorm (elektriciteit en/of waterstof) deze aan land komt. Dit komt terug in de paragraaf 6.5 'Overwegingen voor PEH'. De elektriciteitsproductie zal drastisch veranderen en veel meer ruimte vergen dan de huidige productie van elektriciteit. Zowel wind op land, zon op land en zon op dak en windenergie op zee zullen veel ruimte vergen.

[51] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0230

Figuur 6.5 Grootste elektriciteitsproductielocaties

Robuuste ontwikkelingen

Hieronder zijn voor elektriciteit beknopt de robuuste ontwikkelingen en bijbehorende effecten beschreven die uit de analyse van de IEA naar voren zijn gekomen.

Voor het **220/380kV-netwerk** zijn er twee bovengrondse hoogspanningsverbindingen waarvan wordt voorzien dat er nieuwe verbindingen nodig zijn om de elektriciteit te transporteren. Dit zijn Eindhoven-Maasbracht en Zwolle-Hengelo. Voor Eindhoven–Maasbracht geldt dat deze verbinding al is opgenomen in de nieuwe investeringsplannen van TenneT uit 2022, voor Zwolle–Hengelo is het onzeker of dit knelpunt zich in de praktijk voordoet[52]. Het aanleggen van nieuwe verbindingen geeft met name kans op effecten voor de occupatie- en ondergrondlaag. Het kruisen van of nabije ligging bij woonkernen leidt tot een middelgrote kans op effecten. Voor de ondergrondlaag zijn effecten te verwachten op landschap en op Natura 2000-gebieden door aanvaringsslachtoffers (vogels) met de masten. Nieuwe verbindingen kruisen ook delen van het Natuurnetwerk Nederland. Dit is een aandachtspunt maar biedt mogelijk ook een mee-koppelkans voor versterking van het Natuurnetwerk Nederland door het versterken van habitattypes die goed samengaan met hoogspanningsverbindingen.

[52] Dit wordt mogelijk veroorzaakt door beperkte modellering van de uitwisseling van elektriciteit met het buitenland. Verder onderzoek met gedetailleerdere modellering is nodig om te bepalen of hier echt een uitbreiding nodig is.

Voor de **220/380kV-stations** is uitbreiding of bouw van een nieuw hoogspanningsstation nodig bij de bestaande hoogspanningsstations Dodewaard, Eindhoven, Maasvlakte, Graetheide, Simonshaven/ omgeving en Weiwerd. Bij Simonshaven/omgeving[53] en Borssele/Sloegebied zijn deze uitbreidingen al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022. De aanleg van een nieuw 220kV-station bij Delfzijl/Weiwerd wordt al benoemd in het nieuwe IP2022 van TenneT, maar is daarin nog niet opgenomen als project. Voor Milieu & Ruimte lopen de effecten uiteen voor locaties. Bij het industriële gebied van de Maasvlakte speelt externe veiligheid en beperkt beschikbare ruimte in combinatie met andere ontwikkelingen. In meer open gebieden zoals bij Graetheide en Simonshaven zijn landschap en natuur belangrijke aandachtspunten.

De conclusie voor **batterijopslag** is dat er ruimte nodig is op vele locaties en specifiek op locaties van aanlanding van windenergie op zee. Dit kan de verzwaring van het net meer landinwaarts voorkomen. Bij de aanlandingslocaties voor windenergie op zee vinden veel ontwikkelingen plaats, hierdoor is de beschikbare ruimte schaars. Vanuit zowel Systeemefficiëntie als Milieu & Ruimte zijn hoogspannings-stations of locaties van opwek geschikte locaties voor batterijen. Dit voorkomt extra verbindingen om batterijen aan te sluiten en daarmee mogelijk ook extra effecten op Milieu & Ruimte.

Op de aangewezen **Barro-locaties** voor grootschalige elektriciteitsopwekking is in de toekomst minimaal evenveel ruimte nodig voor regelbare centrales als op dit moment. Door de grote hoeveelheden zonne- en windenergie en variabiliteit in elektriciteitsproductie die hiermee gemoeid is, zijn regelbare centrales een belangrijk onderdeel voor de leveringszekerheid van het energiesysteem.

Beleidsafhankelijke ontwikkelrichtingen (structuurkeuzes)

Afhankelijk van de keuzes die gemaakt worden in de toekomst blijkt uit de structuurkeuzes dat er veel nieuwe verbindingen nodig zijn. Belangrijke keuzes die hierin een rol spelen zijn de verdeling van aan-landing windenergie op zee, toepassing van kernenergie en de benutting van elektriciteit (in industriële clusters, meer landinwaarts, in Duitsland of vooral als productiemiddel voor waterstof).

De structuurkeuzes die onderzocht zijn, leiden tot specifieke oplossingen van knelpunten. Echter, als deze keuze wordt gemaakt, ontstaan andere extra knelpunten waar nieuwe infrastructuurontwikkelingen voor nodig zijn. Per structuurkeuze staan hieronder de belangrijkste conclusies.

Diepe aanlanding Windenergie op zee

- Diepe aanlanding van windenergie op zee wordt pas relevant bij elektrisch aanlanden (i.c.m. elektrolyse op land) van meer dan 30 GW. Tot dat punt is efficiënte verdeling over aanlandings-locaties aan de kust voldoende om extra knelpunten in het 380kV-net te voorkomen
- Een diepe aanlanding bij Maasbracht is effectief om knelpunten van de verbindingen tussen de kust en Limburg op te lossen. Hiermee worden nieuwe bovengrondse verbindingen voorkomen.
- Voor Milieu & Ruimte is het voorkomen van nieuwe bovengrondse verbindingen gunstig omdat deze een grote kans op effecten hebben op landschap (doorkruising van landschappen) en natuur (aan-varingsslachtoffers). Daarnaast is een minder groot ruimtebeslag nodig in de haven van Rotterdam waar beschikbare ruimte schaars is.
- Bij diepe aanlanding van windenergie op zee zijn er voor Milieu & Ruimte wel effecten te verwachten op landbouw en recreatie bij Maasbracht als gevolg van de benodigde ruimte voor infrastructuur-onderdelen. Verder is het kruisen van waterwingebieden en boringsvrije zones een aandachtspunt.

[53] Dit is een additionele uitbreiding ten opzichte van de uitbreiding die al opgenomen is in het IP2020 (zie Figuur 2.2).

- Een diepe aanlanding bij Diemen is effectief om (lastig oplosbare) knelpunten in 380kV-verbindingen in Noord-Holland op te lossen. Echter is er onvoldoende ruimte beschikbaar bij Diemen om aan te sluiten op het 380kV-net en de overige benodigde energie-infrastructuur zoals converterstations, batterijen en elektrolysers te realiseren, die nodig zijn voor een stabiel energiesysteem. Voor een eventuele diepe aanlanding voor de noordelijke helft van Nederland is een andere locatie dan Diemen nodig waar ruimte beschikbaar is of kan worden gemaakt.
- De maatschappelijke kosten van diepe aanlanding windenergie op zee zijn hoog.

Aanlanding Windenergie op zee aan kust

- Het meer evenredig verdelen van de aanlanding van elektriciteit uit windenergie op zee over meerdere locaties aan de Nederlandse kust is vanuit het energiesysteem beter dan geclusterde aanlanding bij grote vragers in Noord- en Zuid-Holland.
- Deze verdeling over meerdere locaties aan de Nederlandse kust is ook gunstig vanuit het ruimte-beslag in de industriële clusters. De benodigde ruimte voor converterstations, elektrolysers en batterijen bij de aanlanding van windenergie op zee wordt beter verspreid tussen locaties waardoor er een verlichting van de ruimtedruk komt op bijvoorbeeld de Rotterdamse haven.
- Voor een goede afweging moeten ook de effecten op zee in de overweging worden betrokken, dit valt buiten de scope van PEH en deze IEA. Dit is onderdeel van VAWOZ 2031-2040.
- De conclusies gelden tot 30 GW aanlanden in de vorm van elektriciteit (i.c.m. elektrolyse op land). Boven de 30 GW is het gebruiksdoel (elektriciteit voor direct gebruik in Nederland en/of Duitsland, of productie H_2) van de extra windenergie op zee bepalend.

Locaties Hernieuwbare opwek op Land (HOL)

- Bij meer hernieuwbare opwek op land dan de geplande RES-doelen na 2030, kan er gekozen worden voor het clusteren of spreiden van opwek door zonne- en windenergie op land.
- Bij spreiding van de opwek is ook al sprake van een redelijke mate van clustering omdat in bepaalde gebieden in Nederland de bebouwingsdichtheid lager is en er op die plekken dus ruimte beschikbaar is voor de realisatie van hernieuwbare opwek. Hierdoor is verdergaande clustering van hernieuwbare opwek van kleine invloed.
- Het effect op het hoogspanningsnet van spreiding of clustering is beperkt, het is onduidelijk of spreiding effectiever is dan clustering of omgekeerd. Ook de effecten op regionale netten is beperkt. Effecten op de energie-infrastructuur zijn dus niet doorslaggevend voor de keuze om wel of niet te clusteren voor hernieuwbare opwek op land.
- Clustering van hernieuwbare opwek is landelijk gezien vanuit landschap en natuur meer wenselijk. Op deze manier kunnen Nationale Landschappen ontzien en effecten op vogels beperkt worden. Op de plekken van clustering zijn lokaal wel grote effecten op landschap, natuur en leefomgeving te verwachten. Spreiding van opwek heeft effecten op landschappen en Natura 2000-gebieden door heel Nederland.
- Clustering van hernieuwbare opwek op land leidt tot lagere maatschappelijke kosten doordat minder mensen effecten ondervinden.
- De conclusie op basis van de structuurkeuze is dat het clusteren van zon en wind op land weinig uitmaakt voor de benodigde infrastructuur. Clustering verkleint wel de effecten die ontstaan bij opwek met windturbines en zonnepanelen en leidt tot lagere maatschappelijke kosten.

Clustering van grote elektrolysers

- Grote clusters van elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee hebben vanuit het perspectief van het elektriciteitssysteem de voorkeur t.o.v. plaatsing van clusters bij grote vragers van H_2 omdat hiermee extra hoogspanningsverbindingen kunnen worden voorkomen.
- Plaatsing van de elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee leidt tot weinig extra knelpunten in het waterstofnet omdat het nationale waterstofnetwerk hier al voorzien is.
- Voor Milieu & Ruimte leidt clustering van elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee tot de minste effecten omdat er minder nieuwe bovengrondse verbindingen nodig zijn. Aandachtspunt hierbij is een groter (cumulatief) ruimtebeslag bij de aanlandingslocaties voor windenergie op zee.
- De mogelijkheden voor warmtebenutting in de industriële clusters zijn beperkt terwijl er bij de stedelijke locaties behoefte is aan groene warmte. Dit kan met warmtetransportleidingen worden opgelost.

Locaties regelbare centrales (regelbare centrales)

- In totaal is er tot ongeveer 30 GW aan regelbare centrales nodig om de zekerheid van levering in stand te houden bij alle weerssituaties.
- Clustering van regelbare centrales op Barro-locaties leidt niet tot extra knelpunten in het hoog-spanningsnet. Wel zijn er naar verwachting verschillende nieuwe aansluitleidingen nodig om de vraag van waterstof en/of methaan die als brandstof voor de regelbare centrales nodig is te faciliteren.
  Dit heeft geen ruimtelijk effect wanneer deze leidingen kleinere bestaande leidingen vervangen binnen een gereserveerde buisleidingenstrook. Waar een extra centrale naast een huidige centrale wordt geplaatst is een extra parallelle leiding nodig. Waar deze niet in een buisleidingenstrook liggen is een beperkt ruimtelijk effect.
- Bij spreiding van kleinschalige regelbare centrales zijn er meer mogelijkheden voor redispatch, waardoor er sprake is van meer flexibiliteit voor het energiesysteem. Dit heeft mogelijk wel gevolgen voor het regionale buisleidingennet door de aansluiting van de verspreide regelbare centrales.
  Dit laatste valt buiten de scope van de IEA en PEH.
- Spreiding van kleinschalige regelbare centrales voegt op veel verschillende locaties in Nederland een nieuwe risicobron toe. Bij clustering op de Barro-locaties is de omgeving hier al op ingericht.
- De beschikbare ruimte op Barro-locaties is beperkt. Bij clustering van regelbare centrales is het mogelijk dat de Barro-locaties uitgebreid moeten worden. Dit kan lokaal grote effecten hebben op landbouw, natuur en nabijgelegen woonkernen.
- Gezien de lage bedrijfstijd en hoge brandstofkosten voor regelbaar vermogen is het nog onduidelijk of kleine installaties economisch aantrekkelijker zijn dan grote om de minimale hoeveelheid regelbaar vermogen in te vullen. Daardoor is het nog niet bekend of de regelbare centrales groot- of kleinschalig worden.
- De conclusie is dat er een afweging ontstaat van een geclusterd groot ruimtebeslag op bestaande Barro-locaties van grote regelbare centrales tegenover een verspreid kleiner ruimtebeslag van kleinere regelbare centrales op veel locaties zonder ruimtelijke reservering.

Kernenergie

- Kernenergie vergt minder (direct) ruimtebeslag voor de productie van elektriciteit in vergelijking met windenergie op land. Effecten vanuit Milieu & Ruimte zijn kleiner op locaties waar kernenergie wordt gerealiseerd in vergelijking met locaties van windenergie. Echter zijn er bij plaatsing van 5 GW aan kerncentrales bij Borssele/Sloegebied en 3,3 GW kerncentrales op de Maasvlakte verschillende nieuwe bovengrondse verbindingen nodig vanuit Borssele/Sloegebied en Maasvlakte landinwaarts om

de grote hoeveelheid elektriciteit te transporteren. Dit komt door de combinatie van kernenergie en windenergie op zee op beide locaties. Voor Milieu & Ruimte ontstaan hierdoor een grote kans op effecten voor landschap, natuur en leefomgeving.

- Vanuit externe veiligheid heeft kernenergie kleinere kans op effecten ten opzichte van windenergie, maar de omvang van de effecten is zeer groot. Bij wind op land is de omvang van de effecten kleiner, meer lokaal en kent meer mogelijkheden om effecten te beperken.
- Bij kernenergie is er minder opslag van elektriciteit noodzakelijk.
- Het is onzeker of kernenergie tot hogere of lagere maatschappelijke kosten leidt, omdat:
  - de kosten van productie dominant zijn en daarover is veel onzekerheid;
  - de externe kosten een fractie zijn van de directe kosten, behalve bij een ongeluk.

6.2.2 Benodigde ruimte voor energie-infrastructuur door ontwikkeling gasvraag, -productie en opslag

Omdat in een klimaatneutrale energievoorziening hernieuwbare gassen nodig zijn, schakelt de aardgas-infrastructuur om naar waterstof en groengas. Welk gas in welk gebied ingezet gaat worden en in welke verhouding, is niet overal duidelijk, met name niet in de distributiegebieden en daardoor ook niet op het niveau van gastransport. De vraag naar hernieuwbaar gas is in 2050 voor alle scenario's lager dan de huidige aardgasvraag. Zelfs rekening houdend met de lagere energie-inhoud van waterstof ten opzichte van aardgas, kan de huidige aardgasinfrastructuur na ombouw voldoende capaciteit leveren voor transport van waterstof op het hoofdleidingennet. Wel kan het zo zijn dat aansluitleidingen onvoldoende capaciteit blijven hebben. Dat is bijvoorbeeld het geval bij clustering van regelbare gascentrales met een groter vermogen dan de huidige centrales. Daarnaast zijn er voor aansluiting van elektrolysers nieuwe leidingen naar het gasnet nodig. Voor de opslag van waterstof in zoutcavernes is nieuwe infrastructuur nodig, met een ruimtebeslag als gevolg. Enige onzekerheid is er over het ruimtebeslag van de gasleidingen naar de productielocaties van elektriciteit met regelbare gascentrales. Er ontstaat een ruimtebeslag waar een parallelle leiding nodig is buiten een gereserveerde buisleidingenstrook. Of dit nodig is, is nog onzeker. Daarnaast is er ook onzekerheid over het ruimtebeslag van gasleidingen naar de opslag van waterstof in zoutcavernes (Zuidwending).

Figuur 6.6Gastransport en -opslag

Robuuste ontwikkelingen

Voor het **nationale waterstofnetwerk** kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Aantakkingen naar opslaglocaties zoals Zuidwending, grootschalige elektrolysers en regelbare centrales vereisen extra ruimte. Het gaat om relatief korte nieuwe aansluitleidingen die vaak parallel aan bestaande leidingen kunnen worden aangelegd. Hiermee is de ruimtevraag beperkt en zijn ook de effecten op Milieu & Ruimte klein.
- De capaciteit van het hoofdtransportnet is voldoende voor de verwachte vraag.

Ten aanzien van **elektrolyse** kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Voor een elektrolyser zijn verschillende aspecten van belang:
  - Beschikbare ruimte voor elektrolyser inclusief installaties voor demi-water, zuurstof, koelwater, e.d.
  - Aansluiting op het elektriciteitsnet;
  - Aansluiting op het waterstofnet.
- Er is in ieder geval meer ruimte nodig op de Maasvlakte en bij Borssele/Sloegebied ten behoeve van grootschalige elektrolyse omdat dit aanlandingslocaties voor windenergie op zee zijn én er voor industriële toepassing een grote behoefte zal zijn aan waterstof.
- Elektrolysers aan de kust waar windenergie aan land komt, hebben de voorkeur omdat dan geen extra verzwaring van het elektriciteitsnet meer landinwaarts nodig is (zie ook paragraaf 6.2.1).

Voor de **opslag van waterstof** kan de conclusie worden getrokken dat, om voldoende opslagcapaciteit te hebben zodra waterstof een dominante energiedrager wordt, de ontwikkeling van opslag van waterstof in de zoutcavernes nodig is.

Beleidsafhankelijke ontwikkelrichtingen (structuurkeuzes)

De structuurkeuzes die onderzocht zijn, leiden tot specifieke oplossingen van knelpunten. Echter, als deze keuze wordt gemaakt, ontstaan andere extra knelpunten waar nieuwe infrastructuurontwikkelingen voor nodig zijn. Per structuurkeuze, relevant voor gassen, zijn de belangrijkste conclusies hieronder aangegeven.

Waterstofopslag

- Opslag van waterstof in zoutcavernes is geschikt voor opslag van waterstof in korte cycli, deze opslag is efficiënt en technisch ontwikkeld. Opslag van waterstof in lege gasvelden is technisch nog niet bewezen en vereist nader onderzoek.
- Bij grootschalig gebruik van zoutcavernes zijn er meerdere nieuwe cavernes nodig in noordoost Nederland. Deze moeten eerst worden aangelegd en vervolgens ook aangesloten worden op het nationale waterstofnetwerk. Effecten hiervan zijn mogelijke bodemdaling en ruimtebeslag door pompinstallaties en aansluitleidingen verspreid over het gebied waar zoutcavernes worden aangelegd.
- Een kwantitatieve welvaartsanalyse is lastig door grote onzekerheden ten aanzien van de toepassing van opslag in lege gasvelden en bijbehorende risico's. Daarom kan niet geconcludeerd welke vorm van opslag beter beoordeeld wordt op welvaart.

Clustering van grote elektrolysers (ook al genoemd bij elektriciteit)

- Elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee hebben vanuit het perspectief van het elektriciteitssysteem de voorkeur t.o.v. spreiding en plaatsing bij grote vragers van H_2 omdat hiermee extra hoogspanningsverbindingen kunnen worden voorkomen.
- Plaatsing van de elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee leidt tot weinig extra knelpunten in het waterstofnet omdat het nationale waterstofnetwerk hier al voorzien is. Wel zijn aansluitleidingen naar het nationale waterstofnetwerk nodig.
- Voor Milieu & Ruimte leidt clustering van elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee tot de minste effecten omdat er minder nieuwe bovengrondse hoogspanningsverbindingen nodig zijn. Er is wel groter (cumulatief) ruimtebeslag bij de aanlandingslocaties voor windenergie op zee.
- De warmtebenutting in de industriële clusters is beperkt terwijl er bij de stedelijke locaties behoefte is aan groene warmte. Dit kan met warmtetransportleidingen worden opgelost.

Regelbare centrales (clustering van centrales)

- Het spreiden van regelbare centrales geeft meer knelpunten op het gastransportnet omdat er meer aansluitleidingen van onvoldoende capaciteit zijn dan bij het clusteren van regelbare centrales.
- Of er ruimtelijke effecten optreden in de infrastructuur tussen de regelbare centrales en het waterstofnetwerk is nog onzeker. Wanneer een vervangende leiding nodig is omdat de huidige leiding onvoldoende capaciteit heeft is er geen ruimtelijk effect. Een beperkt ruimtelijk effect treedt op bij de keuze voor een parallelle leiding naar een extra centrale waar de huidige leiding niet in een buisleidingenstrook ligt.

6.2.3 Benodigde ruimte voor energie-infrastructuur door ontwikkeling warmtevraag en -productie

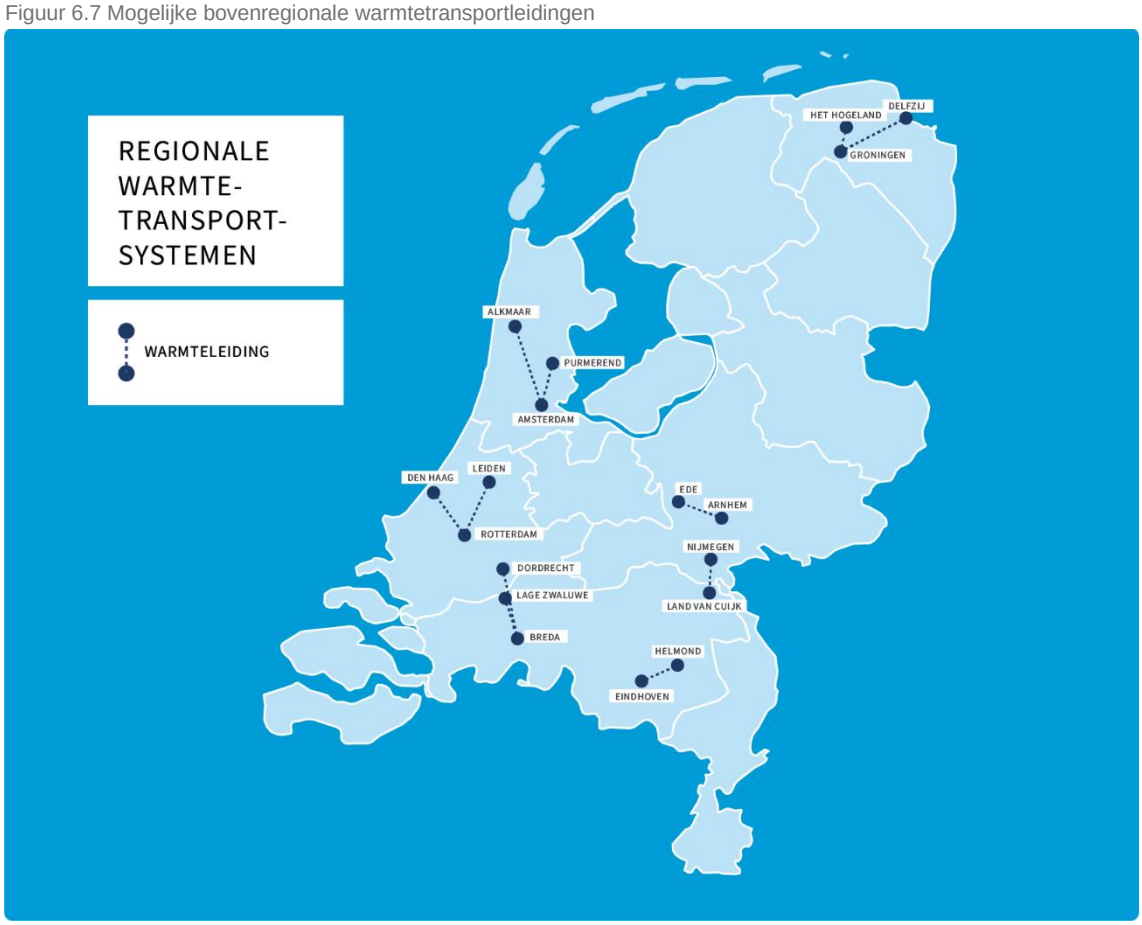
In een aantal gebieden in Nederland bestaat potentie voor het realiseren van regionale warmtetransport-systemen. In Noord-Brabant bestaat al een transportleiding van de Amercentrale naar Breda en Tilburg. Deze wordt waarschijnlijk aangesloten op Moerdijk. In Zuid-Holland wordt al enkele jaren een transport-systeem voorbereid van de Maasvlakte naar Rotterdam, Den Haag en het Westland. Daarnaast zijn warmteleidingen mogelijk in de regio Hengelo en Enschede, in de regio Groningen en in de regio Limburg. Deze warmtetransportleidingen zullen restwarmtebronnen bij de industrie (proceswarmte, elektrolysers) verbinden met de warmtedistributiegebieden in de stedelijke omgeving. Daarnaast kunnen er nog vele andere regionale netten ontstaan, maar dat valt buiten de scope van deze IEA.

Naast productie van waterstof wordt de benutting van de restwarmte in de toekomstige energievoorziening steeds belangrijker. Bij elektrolyse komt restwarmte vrij. Benutting van restwarmte is nu niet aangemerkt als aspect van nationaal belang. De onderzochte structuurkeuzes leiden tot oplossing van specifieke knel-punten, maar ook tot andere extra knelpunten. Voor warmte is er één structuurkeuze onderzocht en is de belangrijkste conclusie hieronder beschreven.

Binnenlandse warmtebronnen (restwarmte of geothermie)

- De directe kosten van restwarmte zijn lager dan die bij gebruik geothermie.
- Gebruik van restwarmte heeft zich al bewezen op grote schaal. De risico's van restwarmte zijn kleiner (kwalitatief beoordeeld), het is goedkoper en minder onzeker dan geothermie.
- Bij beide opties zijn bovenregionale transportleidingen nodig, maar op andere locaties.
- Voor geothermie is er bij (aanleg van) transportleidingen tussen Dordrecht–Breda, Purmerend–Amsterdam en Ede–Arnhem een grote kans op effecten op Natura 2000 en in de regio's Rotterdam en Amsterdam is er door hoge dichtheid van woonkernen een grote kans op effecten.
- Bij toepassing van restwarmte heeft de transportleiding tussen Purmerend–Amsterdam een grote kans op effecten op Natura 2000 en in de regio's Rotterdam en Amsterdam is er door hoge dichtheid van woonkernen een grote kans op effecten.

Figuur 6.7 Mogelijke bovenregionale warmtetransportleidingen



6.2.4 Benodigde energie-infrastructuur overige buisleidingen

Voor het transport van andere gassen dan waterstof en groengas, en grondstoffen bestaan diverse leidingtracés tussen industriële clusters. Hiervoor is geen nieuw ruimtebeslag te verwachten; de bestaande buisleidingenstroken zijn voldoende omdat hier nog mogelijkheden zijn voor extra buisleidingen. Wel is geconstateerd dat de reservering van buisleidingen niet altijd adequaat is gehandhaafd en andere toepassingen in de weg kunnen staan. De structuurkeuzes die onderzocht zijn, leiden tot specifieke oplossingen van knelpunten. Echter, als deze keuze wordt gemaakt, ontstaan andere extra knelpunten waar nieuwe infrastructuurontwikkelingen voor nodig zijn. Per relevante structuurkeuze zijn de belangrijkste conclusies hieronder beschreven.

Binnenlandse productie synthetische brandstoffen

- Bij binnenlandse productie van synthetische brandstoffen is extra ruimte nodig in Nederland in industriegebieden voor productiefabrieken van synthetische brandstoffen, regelbare centrales en DAC-installaties. Ook is er meer opslag nodig voor waterstof in zoutcavernes of lege gasvelden. Dit levert een nog grotere ruimtedruk op bij de industrieclusters. Daarnaast is bij binnenlandse productie van synthetische brandstoffen nog altijd forse import nodig, dus ook nog ruimte voor importterminals.
- Er komt voor de productielocaties ruimte vrij bij bestaande raffinaderijen, maar deze ruimte kan ook worden gebruikt voor de ruimtebehoefte van batterijen en elektrolysers.
- Als er geen binnenlandse productie komt is meer ruimte nodig voor importterminals.

Faciliteren doorvoer grondstoffen naar buitenland

- Als de doorvoer van grondstoffen naar het buitenland via buisleidingen gefaciliteerd wordt is er extra ruimte nodig voor importterminals en opslag in met name Rotterdam. De druk op de ruimte is hier al groot door bestaande industrie en een omvangrijke opgave voor het invullen van andere onderdelen van de energietransitie.
- De ontwikkeling van de Delta Rhine Corridor zorgt ervoor dat er voldoende capaciteit is voor doorvoer van grondstoffen zonder extra ruimte door buisleidingen. De behoefte aan transport past binnen de bestaande reserveringen van buisleidingenstroken als de geconstateerde ruimtelijke knelpunten binnen deze reserveringen worden opgelost.
- Het faciliteren van doorvoer van grondstoffen naar het buitenland kan economische voordelen opleveren.

6.3 Conclusies per gebied

Deze paragraaf bevat geen nieuwe conclusies ten opzichte van de voorgaande paragraaf, maar een overzicht van de belangrijkste conclusies geordend naar zes gebieden van Nederland zodat de conclusies een relatie krijgen met die gebieden (zie Bijlage XIII voor de uitgebreide analyses). Beseft moet worden dat deze conclusies betrekking hebben op ontwikkelingen na 2030. De lopende plannen van de netbeheerders (IP2022) zijn als basis genomen en de veronderstelling is dat deze al zijn uitgevoerd.

Noord-Nederland (Groningen, Friesland, Drenthe)

De meest kritische ruimtelijke ontwikkelingen zijn de ontwikkeling van nieuwe energie-infrastructuur bij de Barro-locaties Eemshaven en Delfzijl en ontwikkelingen in de ondergrond (bijvoorbeeld voor opslag van gassen). Op de Barro-locaties is mogelijk sprake van meervoudig ruimtebeslag door energie-infrastructuur (aanlanding windenergie op zee, hoogspanningsstations, elektrolysers, batterijen en elektriciteits-centrales). Op de Barro-locaties in Noord-Nederland is naar verwachting voldoende ruimte beschikbaar voor deze ontwikkelingen.

Momenteel zijn er enkele aardgasopslagen in Noord-Nederland. In de toekomst ontstaat vraag naar opslag van waterstof en methaan. Waterstof kan opgeslagen worden in zoutcavernes en mogelijk in bestaande gasopslagen en in lege gasvelden in Noord-Nederland. Als nieuwe gasopslagen/zoutcavernes gerealiseerd worden, moeten extra buisleidingen aangelegd worden om de gasopslagen/zoutcavernes te verbinden met het nationale waterstofnetwerk.

Door de forse afvoercapaciteit van het 380kV-net in Noord-Nederland is het mogelijk om zowel veel aanlanding van windenergie op zee, grootschalige hernieuwbare opwek op land als grote hoeveelheden regelbare centrales te faciliteren zonder dat hiervoor grootschalige uitbreiding van de hoogspannings-infrastructuur voor nodig is. Dit maakt Noord-Nederland geschikt voor grootschalige elektriciteitsproductie. Mogelijke clustering van zonne- en windenergie op land in deze regio heeft lokaal grote effecten voor landschap en natuur.

Noord-Holland & Flevoland

De meest kritische ruimtelijke ontwikkelingen zijn nieuwe puntinfrastructuur bij de Barro-locaties Beverwijk en Diemen, nieuwe bovengrondse 380kV-verbindingen en de ontwikkeling van Middenmeer of Den Helder als mogelijk aanlandingslocaties van windenergie op zee. Op de Barro-locaties en aanlandingslocaties van windenergie op zee is mogelijk sprake van meervoudig ruimtebeslag voor energie-infrastructuur

(aanlanding windenergie op zee, hoogspanningsstations, elektrolysers, batterijen en regelbare centrales). Bij Diemen en Beverwijk is de beschikbare ruimte zeer beperkt.

Daarnaast is na 2030 mogelijk uitbreiding van de 380kV-infrastructuur in Noord-Holland nodig bij grote hoeveelheden aanlanding van windenergie op zee in de kop van Noord-Holland en ten noorden van Amsterdam. Dit is boven op de geplande uitbreidingen (o.a. in IP2022). Er zijn dan in totaal vier bovengrondse circuits nodig tussen de kop van Noord-Holland en ten noorden van Amsterdam en ook op de verbindingen Beverwijk–Oostzaan, Beverwijk–Vijfhuizen en Oostzaan–Diemen zijn nieuwe circuits nodig[54]. Het aanleggen van deze nieuwe circuits geeft een grote kans op effecten voor Milieu & Ruimte op landschap, cultuurhistorie en woonkernen waardoor de haalbaarheid van de uitbreidingen zeer lastig lijkt. Dit kan worden voorkomen door de elektrische aanlanding van windenergie op zee in de kop van Noord-Holland te beperken. Mogelijke clustering van zonne- en windenergie op land in de kop van Noord-Holland en Flevoland heeft lokaal grote effecten voor landschap en natuur.

Oost- en Midden Nederland (Utrecht, Gelderland, Overijssel)

De meest kritische ruimtelijke ontwikkelingen zijn de uitbreiding van 380kV-infrastructuur en ontwikkeling van nieuwe buisleidingen. Er zijn na 2030 naar verwachting nieuwe 380kV-circuits nodig tussen Zwolle en Hengelo en mogelijk ook tussen Zwolle en Ens. Deze uitbreidingen zijn nodig om uitwisseling van elektriciteit met Duitsland te faciliteren[55]. Effecten op Milieu & Ruimte zijn met name te verwachten in de occupatielaag (kruisen woonkernen) en de ondergrondlaag (Natura 2000).

Daarnaast is mogelijk nieuwe ondergrondse infrastructuur nodig voor aansluiting op de opslag van waterstof. In Duitsland, vlak over de grens, kan mogelijk waterstof opgeslagen worden in zoutcavernes. Als daar voor gekozen wordt, is naar verwachting een nieuwe waterstofbuisleiding nodig tussen Ommen en Winterswijk, parallel aan de bestaande leiding. Daar is dan geen ruimtelijke reservering voor nodig. Daarnaast is mogelijk ruimte in de ondergrond nodig voor bovenregionale warmte-infrastructuren, bijvoorbeeld tussen Cuijk en Nijmegen.

Zuid-Holland

De meest kritische ruimtelijke ontwikkelingen zijn nieuwe puntinfrastructuur in de Rotterdamse haven, ontwikkeling van nieuwe buisleidingen en mogelijke uitbreiding van 380kV-infrastructuur. In de Rotterdamse haven is sprake van meervoudig ruimtebeslag voor energie-infrastructuur (aanlanding windenergie op zee, hoogspanningsstations, import hernieuwbare gassen/brandstoffen, elektrolysers, batterijen en regelbare centrales), terwijl in de Rotterdamse haven beperkt ruimte beschikbaar is.

De Rotterdamse haven is een logische locatie voor import van grondstoffen en hernieuwbare brandstoffen, zoals waterstof en ammoniak. De eerste importterminals zijn ook al gepland. Er kan import plaatsvinden voor binnenlands gebruik, maar er kan ook extra geïmporteerd worden voor doorvoer richting het buitenland (met name Duitsland). Binnen het project van de Delta Rhine Corridor wordt gewerkt aan een buisleidingenbundel van Rotterdam richting Duitsland, maar dit is nog niet definitief. Deze buisleidingenbundel kan ook gebruikt worden voor het laten aansluiten van CO_2-transport van andere industrieclusters op de CCS-infrastructuur in de Rotterdamse haven. Voor de buisleidingen van de Delta Rhine Corridor is geen

[54] Na het onderzoek en de beoordelingen in deze IEA gaat de RCR-procedure voor de verbinding Noord-Holland Noord van start (zomer 2023). Daarin worden zowel 2 als 4 circuits onderzocht.

[55] Het is onzeker of deze uitbreiding echt nodig is, mogelijk komt dit als knelpunt naar voren doordat de uitwisseling van elektriciteit met het buitenland beperkt gemodelleerd is.

extra ruimte nodig: de buisleidingen passen in de bestaande reserveringen. Dit kan wel lokale knelpunten tot gevolg hebben.
Daarnaast is na 2030, bij een combinatie van aanlanding van windenergie op zee en een fors vermogen aan kernenergie, mogelijk uitbreiding van de 380kV-infrastructuur nodig boven op de al geplande uitbreidingen (IP2022). Dit heeft voor Milieu & Ruimte grote effecten waaronder effecten op Natura 2000- en NNN-gebieden tussen Rotterdam en Noord-Brabant. Ook zijn er grote landschappelijke effecten door nieuwe doorsnijdingen van landschappen. Het is aan te bevelen dit mee te wegen in de keuze voor het plaatsen van kerncentrales in de Rotterdamse haven.

Zuid-Nederland (Noord-Brabant & Limburg)

De meest kritische ruimtelijke ontwikkelingen in Zuid-Nederland zijn nieuwe puntinfrastructuur bij de Barro-locaties Moerdijk, Geertruidenberg, Maasbracht en Chemelot, mogelijke uitbreiding van 380kV-infrastructuur en ontwikkeling van nieuwe buisleidingen. Op de Barro-locaties is mogelijk sprake van meervoudig ruimtebeslag voor energie-infrastructuur (aanlanding windenergie op zee, hoogspanningsstations, elektrolysers, batterijen, elektriciteitscentrales), terwijl op deze locaties beperkt ruimte beschikbaar is.

Op dit moment zijn er plannen voor de doorvoer van grondstoffen en brandstoffen vanaf de Rotterdamse haven richting Chemelot en Duitsland via nieuwe ondergrondse buisleidingen. Deze nieuwe leidingen zijn onderdeel van de Delta Rhine Corridor. Deze loopt dwars door Noord-Brabant en Limburg. De behoefte aan transport past binnen de bestaande reserveringen van buisleidingenstroken als de geconstateerde ruimtelijke knelpunten binnen deze reserveringen worden opgelost.

Daarnaast is na 2030 mogelijk uitbreiding van de 380kV-infrastructuur nodig, boven op de geplande uitbreidingen. Of dit noodzakelijk is, is afhankelijk van de ontwikkeling van aanlanding van windenergie op zee en het plaatsen van nieuwe kerncentrales in Zuid-Holland en Zeeland, aangezien deze elektriciteit via het hoogspanningsnet in Noord-Brabant en Limburg afgevoerd wordt richting Limburg, Duitsland en België. Dit heeft grote landschappelijke effecten voor met name Noord-Brabant, waar verschillende nieuwe west-oost verbindingen de provincie doorkruisen. Ook zijn er effecten te verwachten op Natura 2000-gebieden en NNN. Tot slot zijn er ook effecten op woonkernen en recreatiegebieden omdat deze niet overal met voldoende afstand vermeden kunnen worden. Mogelijke diepe aanlanding van ondergrondse verbindingen van windenergie op zee geven aandachtspunten voor waterwingebieden en boringsvrije zones in Noord-Brabant en Limburg.

Zeeland

De meest kritische ruimtelijke ontwikkelingen in Zeeland zijn nieuwe puntinfrastructuur bij de Barro-locaties Borssele/Sloegebied en Terneuzen/Sas van Gent en mogelijke uitbreiding van 380kV-infrastructuur. Op de Barro-locaties is sprake van meervoudig ruimtebeslag van energie-infrastructuur (aanlanding van windenergie op zee, hoogspanningsstations, elektrolysers, batterijen en elektriciteitscentrales), terwijl op deze locaties beperkt ruimte beschikbaar is. Als een uitbreiding van de Barro-locaties noodzakelijk is, heeft dit grote effecten op landbouw en nabijgelegen woonkernen.

Daarnaast is na 2030 mogelijk uitbreiding van de 380kV-infrastructuur nodig, boven op de geplande uitbreidingen, bij een combinatie van aanlanding van windenergie op zee en een fors vermogen aan kernenergie. Dit heeft voor Milieu & Ruimte grote effecten waaronder die op Natura 2000- en NNN-gebieden. Het is aan te bevelen dit mee te wegen in de keuze voor het plaatsen van (extra) kerncentrales in het Sloegebied. Mogelijke clustering van zonne- en windenergie op land in Zeeland heeft lokaal grote effecten voor landschap en natuur.

6.4 Welke ontwikkelingen komen als eerste (2030-2040)?

De belangrijkste ontwikkelingen die impact hebben op de benodigde ruimte voor het hoogspanningsnet zijn de uitrol van wind op zee, het plaatsen van kerncentrales en elektrificatie van de energievraag.
De volgende conclusies kunnen getrokken worden door te kijken naar het verwachte tijdpad van deze ontwikkelingen:

- Tussen 2030 en 2040 zal naar verwachting extra windenergie op zee overwegend in de vorm van elektriciteit aanlanden aan de kust. Dit betekent dat er tussen 2030 en 2040 veel ruimte nodig is bij de aanlandingslocaties aan de kust voor puntinfrastructuur.
- De twee geplande kerncentrales in Borssele worden naar verwachting in de periode 2030-2040 gerealiseerd. Als later nog meer kerncentrales geplaatst worden in Borssele en op de Maasvlakte is mogelijk ruimte nodig voor nieuwe hoogspanningsverbindingen vanaf Zeeland en Rotterdam richting Noord-Brabant.
- Als grote industriële bedrijven elektrificeren, kunnen deze een directe aansluiting op het 380kV-net nodig hebben en zijn hiervoor extra velden bij hoogspanningsstations noodzakelijk. Elektrificatie van de energievraag van andere sectoren zorgt er niet direct voor dat nieuwe hoogspanningsinfrastructuur nodig is (wel extra infrastructuur op regionale schaal). Welke elektriciteitsinfrastructuur verder nodig is voor elektrificatie van de energievraag hangt af van hoe deze extra elektriciteitsvraag ingevuld wordt;
- Richting 2040 zullen regelbare centrales omgebouwd worden naar waterstof of gebruik gaan maken van groengas. Daarom zijn al richting 2040 aanpassingen aan de aansluitleidingen vanaf het landelijke waterstofnet richting deze centrale nodig.

Naast de elektrische infrastructuur zullen ook in de periode 2030-2040 voorzieningen nodig zijn voor het gebruik van waterstof, grondstoffen en grootschalige warmte. De belangrijkste conclusies over het tijdpad van de ontwikkelingen rondom waterstof, grondstoffen en grootschalige warmte zijn:

- Vóór 2040 zijn al elektrolysers nodig. De locaties van grote clusters van elektrolysers volgen waar grote hoeveelheden elektriciteit beschikbaar komt. Dat is met name bij aanlandingslocaties van windenergie op zee. Het tijdig realiseren van elektrolysers op aanlandingslocaties van wind op zee is nodig om verzwaringen aan hoogspanningsinfrastructuur te voorkomen. Voor de realisatie van grootschalige elektrolysers zijn al richting 2040 aanpassingen aan de aansluitleidingen vanaf het landelijke waterstofnet richting deze elektrolysers nodig.
- Tussen 2030 en 2040 is het gereedmaken van één of meerdere huidige zoutcavernes in Zuidwending en bijbehorende infrastructuur voor opslag van waterstof naar verwachting voldoende.
- Voor de grondstofleidingen is de Delta Rhine Corridor relevant. De ambitie is om de eerste leidingen al voor 2030 aangelegd te hebben. Na 2030 ligt verdere uitbreiding in het verschiet als ervoor wordt gekozen om internationale transportstromen te faciliteren.

6.5 Overwegingen voor PEH

6.5.1 Ruimtelijke sturing vanuit nationaal belang

Onderwerp van deze IEA is de ruimte die nodig is voor energie-infrastructuur van nationaal belang in de komende decennia en de effecten die ontstaan op het gebied van milieu, maatschappelijke kosten en systeemefficiency. Hiervoor is het accent in het onderzoek gelegd op de productie en het hoofdtransport van energiedragers.

Aansluitingen van nationaal belang

Van nationaal belang betekent ook dat de Rijksoverheid moet instemmen met aansluiting van een dergelijke installatie op het publieke elektriciteit/gasnetwerk. Voor elektriciteitsgebruik zijn nu geen regels van nationaal belang, alleen voor elektriciteitsproductie (> 500 MWe). Maar er zijn goede redenen om elke aansluiting boven 100 MWe van nationaal belang te verklaren, dus inclusief batterijen en elektrolysers. Die redenen zijn dat de aansluitingen groter worden door elektrificatie van de industrie en daarmee ruimte gevonden moet worden voor de daarvoor noodzakelijk energiehoofdinfrastructuur. En om te voorkomen dat overal in het land grote verbruikers aangesloten moeten worden op het elektriciteitsnet.
Naast productie wordt vraag hierdoor ook een aspect van nationaal belang.

Reserveren ruimte voor bestaande en geplande infrastructuur

Reserveren van de ruimte van de huidige infrastructuur inclusief de reeds geplande uitbreiding (IP2022) is wenselijk zodat deze ruimte beschikbaar blijft voor het energiesysteem, ook al wordt deze tijdelijk niet gebruikt (bijvoorbeeld door afbraak van oude elektriciteitscentrales).

Wat betekenen Barro-locaties?

Er zijn diverse ruimtelijke reserveringen voor het energiesysteem. De Barro-locaties zijn daarvan het meest duidelijk, maar ook de ruimtereservering voor hoogspanningsverbindingen en buisleidingtracés. Tijdens de analyse is geconstateerd dat deze reserveringen geen garantie betekenen voor het kunnen gebruiken van die ruimte. Provinciale en gemeentelijke overheden houden deze ruimte niet per se vrij voor (alleen) het energiesysteem. Zeker in de gebieden met een grote energievraag en veel -productie (vooral de industriële clusters aan zee) ontstaat een wedijver met andere ruimtetoepassingen. Om in de toekomst de gereserveerde ruimte werkelijk te kunnen gebruiken, zal aanwijzing gepaard moeten gaan met goede handhaving.

Beheer leidingstraten

Het is gebleken dat er weinig overzicht is van beschikbare ruimte in de huidige leidingstraten (buisleiding-tracés), De ruimte is er wel op industrielocaties, echter niet in de gebieden tussen de industrielocaties in. Net als bij de Barro-locaties is te zien dat reserveringen niet altijd beheerd worden. De vraag is hoe in de toekomst het beheer het beste kan gebeuren om ervoor te zorgen dat de gereserveerde ruimte beschikbaar blijft voor energietoepassingen.

6.5.2 Overwegingen bij keuzes in het energiesysteem

Op basis van de IEA, waarin geanalyseerd is of er met grote zekerheid nieuwe energie-infrastructuur nodig is ten gevolge van de (grote) veranderingen van het energiesysteem, wordt duidelijk waar het grootste ruimtebeslag voor de energie-infrastructuur te verwachten is. Voor een deel is dit ruimtebeslag afhankelijk van keuzes die de (rijks)overheid de komende tijd zal gaan maken, vooral met betrekking tot de omvang en locaties van windenergie, zonne-energie en kernenergie. Die strategische keuzes hebben

effect op het energiesysteem, maar zeker ook op de noodzakelijke ruimte (locatie en omvang) van de energie-infrastructuur. Hieronder volgen de belangrijkste overwegingen voor keuzes in het energie-systeem.

Opslag waterstof in lege gasvelden

Onderzocht kan worden of bestaande gasvelden gebruikt kunnen worden voor de opslag van waterstof. Lege gasvelden dichter bij de gebruikers en productiepunten van waterstof, kunnen het benodigde ruimte-beslag voor opslag van waterstof in zoutcavernes beperken. Het is echter nog onzeker onder welke condities de gasvelden gebruikt kunnen worden voor opslag van het kleinere molecuul waterstof. Hiervoor is nader onderzoek nodig.

Andere locaties kerncentrales

De twee locaties voor kernenergie die zijn onderzocht liggen bij aanlandingspunten voor windenergie op zee. Dit kan bij in totaal 8,3 GW aan kerncentrales zorgen voor de noodzaak tot extra hoogspannings-verbindingen en bijbehorende infrastructuur om de elektriciteit naar het achterland te transporteren, of het kan leiden tot minder capaciteit voor aanlanding van windenergie op die locaties. Als kernenergie met deze grote vermogens wenselijk is als productiemiddel voor elektriciteit, kan een andere locatie verder landinwaarts aanleg van extra hoogspanningsinfrastructuur voorkomen. Dit kan vanuit landschappelijk en ecologisch perspectief gunstig zijn.

Balancering van het elektriciteitssysteem – batterijen en elektrolysers

Batterijen kunnen de meeste knelpunten op het 150/110kV-net beperken/voorkomen. Hoogspannings-stations lijken logische locaties voor grootschalige batterijen, maar ook grote hoeveelheden kleinschalige batterijen zijn een optie (bij een productielocatie van elektriciteit uit zonne-energie of windenergie). In scenario's van de IEA (gebaseerd op de integrale infrastructuurverkenning II3050) is er voor gekozen om bij de onderstations zowel elektrolysers als batterijen te plaatsen om vraag en aanbod maximaal te koppelen. Dit is bepaald vanuit optimalisatie vanuit het energiesysteem en niet vanuit een economische en/of ruimtelijke optimalisatie. Deze hoeveelheid batterijen vergt tegelijkertijd veel ruimte en het is maar de vraag of alle batterijen/elektrolysers die uit de modellering van de integrale infrastructuurverkenning II3050 volgen daadwerkelijk nodig zijn. Een optimalisatiestudie is nuttig voordat daadwerkelijk overal ruimte wordt gereserveerd voor en realisatie plaatsvindt van batterijen én elektrolysers.

Balancering van het elektriciteitssysteem – regelbare centrales

Door het fluctuerende karakter van elektriciteitsproductie uit zon en wind en de noodzaak om op elk moment te voorzien in de vraag maar elektriciteit, is er waarschijnlijk een behoefte aan ongeveer 30 GW aan centrale of decentrale regelbare centrales. Om deze centrales te kunnen realiseren is handhaving van de ruimte op bestaande Barro-locaties nodig. Een economische optimalisatie, inclusief de eventueel daar-voor noodzakelijke aanpassingen van de economische incentives om regelbare centrales te ontwikkelen, kan meer zekerheid geven over het ruimtebeslag van grote regelbare centrales. Op dit moment is voor zowel grootschalige als kleinschalige regelbare centrales onzekerheid over de businesscase.

Aanlanding elektriciteit van extra windenergie op zee

Afhankelijk van de toepassing van elektriciteit van windenergie op zee is verschillende infrastructuur nodig. Hierbij gaat het om direct gebruik van elektriciteit (niet zijnde elektrolysers) in Nederland of in Duitsland/ België of om conversie van de elektriciteit naar waterstof. Indien elektriciteit zoveel mogelijk direct gebruikt moet worden, betekent dit dat grote hoeveelheden elektriciteit naar België en Duitsland getransporteerd moeten gaan worden. In het geval van conversie naar waterstof, dan is conversie op zee of direct aan de

kust voor de hand liggend en niet in het achterland. Zo wordt extra transportcapaciteit voor elektriciteit vermeden. Als de elektriciteit vooral doorgevoerd wordt naar Duitsland, is diepe aanlanding (Maasbracht) te overwegen om daarmee ruimtebeslag en bijbehorende effecten op land te beperken.

Nieuwe aansluitingen > 100 MWe

Uit de analyse blijkt dat afgewogen locatiekeuzes voor grootschalige productie en afname van elektriciteit en waterstof de noodzaak van aanzienlijke uitbreiding van het elektriciteitsnet kan voorkomen. Hierbij gaat het om de nabijheid van aansluiting op het hoogspanningsnet voor elektriciteit van windenergie op zee, maar ook grote elektrolysers, batterijen, zonneparken en windparken op land én grote extra vraag van elektriciteit. Ook de benutting van restwarmte van elektrolysers kan zo in de nationale afweging worden betrokken. Door als Rijksoverheid zeggenschap te creëren in de locatie van nieuwe elektriciteitsvraag/productie kan een afweging gemaakt worden of de betreffende locatie enerzijds de optimale inzet van flexinstallaties (opslag, productie, extra vraag) bevordert en anderzijds geen onnodige extra infrastructuur vereist. Het gaat dan zowel om de bevoegdheid bij realisatie van aansluitingen voor de productie van elektriciteit groter dan 100 MWe, als voor de vraag naar elektriciteit (batterijen, industrie, elektrolysers).

Maatwerk: kijk naar meervoudig ruimtegebruik, meekoppelkansen en regionale verschillen

Vervolgprojecten voor deze ontwikkelingen dienen mogelijkheden tot meervoudig ruimtegebruik nader te onderzoeken. Dit is in dit document in beperkte mate meegenomen vanwege het relatief hoge abstractieniveau van de IEA. Meervoudig ruimtegebruik dient aan te sluiten bij de lokale behoefte en mogelijkheden. Daarnaast is het van belang om in de vervolgtrajecten de cultuur en dynamiek van gebieden/provincies te gebruiken bij de uitwerking van de ontwikkelingen. Het perspectief op kansen en belemmeringen in het domein van Milieu & Ruimte verschilt per gebied en kan dus leiden tot andere oplossingen op vergelijkbare ontwikkelingen. Ook is het aan te bevelen meekoppelkansen voor natuur en biodiversiteit nader te onderzoeken vanuit zowel regionaal als nationaal perspectief. Bijvoorbeeld de mogelijkheid om het netwerk van hoogspanningsverbindingen te koppelen aan bepaald type natuurontwikkeling die goed met elkaar samengaat.

Overkoepelende blik: visie en regie voor een breed gedragen energiesysteem in 2050

De opgave die voorligt, is van dusdanige omvang en heeft een impact op alle drie de lagen (occupatie, netwerk en ondergrond) verspreid over Nederland. Hiervoor is centrale regie op realisatie en de uiteindelijke (beeld)kwaliteit wenselijk. Het vergt denken op langere termijn met een duidelijke visie op het energiesysteem van de toekomst. Dit betekent onder andere het maken van nadere afspraken over grootte, vorm en uitstraling en landschappelijke inpassing van energie-infrastructuur die daarnaast nog ruimte biedt om de eerder genoemde cultuur en dynamiek van gebieden tot hun recht te laten komen. • In het kader van PEH zijn al gesprekken gevoerd met alle provincies. Ook zijn verschillende inzichten meegegeven in het traject van Provinciale Arrangementen wat o.l.v. de minister voor Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening is gestart.

6.5.3 Tot slot

Het proces bij het opstellen van deze IEA heeft bijna drie jaar gelopen. In die drie jaar is er veel gebeurd in de energietransitie en zijn er veel plannen gemaakt voor verduurzaming van de industrie, technische en economische ontwikkelingen die de kansen voor bepaalde technieken vergroten en voor andere weer verkleinen. Dat proces is zeker nog niet ten einde en in dit onderzoek is de ontwikkeling van energievraag en -productie zo goed als mogelijk ingeschat op basis van de huidige inzichten en plannen van velen. Tot op het laatste moment zijn die geactualiseerd, maar dat kan niet voorkomen dat er zich nu al nieuwe ontwikkelingen aandienen die een groot effect kunnen hebben op de situatie in de komende decennia, zonder dat die zijn meegenomen. Er is uitgegaan van dezelfde mate van leveringszekerheid als de huidige, passend binnen de huidige economische parameters, maar een discussie daarover zou zinvol zijn omdat daarmee de hoeveelheid flexmiddelen, en daarmee de noodzakelijke ruimte, zou kunnen worden beperkt. De conclusie dat het energiesysteem de komende decennia meer ruimte zal vergen en dat dit vaak conflicteert met andere ruimtelijke opgaves. Daarom moeten bij de andere ruimtelijke opgaves zo vroeg en zo veel mogelijk al rekening worden gehouden met de energie-infrastructuurontwikkelingen.

7 Bronnen

Berenschot & Kalavasta. (2020). Klimaatneutrale energiescenario's 2050.

Europese Commissie. (2022). REPowerEU Plan SWD 2022 230 Final. Brussel.

Gasunie. (2020). Investeringsplan GTS 2020-2030. Gasunie transport services.

Gasunie. (2020). Investeringsplan GTS 2020-2030. Gasunie transport services.

Gasunie. (2022). Investeringsplan GTS 2022-2032.

Ministerie van Financiën. (2020). Rapport Werkgroep Discontovoet 2020. Den Haag: Ministerie van Financiën.

Netbeheer Nederland. (2021). Het Energiesysteem van de Toekomst.

Ruimte met Toekomst. (2022). Opgehaald van ruimtexmilieu: http://ruimtexmilieu.nl/wiki/ontwikkelconcepten/lagenbenadering

TenneT. (2020). Opgehaald van Investeringsplan Net op land 2020-2029.

TenneT. (2022). Opgehaald van Ontwerpinvesteringsplan Net op land 2022-2031: https://www.tennet.eu/nl/over-tennet/publicaties/investeringsplannen

TNO & EBN. (2021). Ondergrondse energieopslag in Nederland 2030 – 2050.

TNO. (2021). Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030-2050. Technische evaluatie van vraag en aanbod. Utrecht: TNO.

TNO. (2022). De impact van windturbines op huizenprijzen.