

BIJLAGE VII Beschrijving robuuste knelpunten en ontwikkelingen 2050

Integrale Effectenanalyse Programma Energiehoofdstructuur 2023

Ontwikkeling energiehoofdinfrastructuur 2030-2050

Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Definitief
02-06-2023



Pondera

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

CE Delft

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

In samenwerking met:



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

Colofon

Soort document
Integrale Effectanalyse

Projectnaam
IEA Programma Energiehoofdstructuur 2023

Versienummer
Definitief

Opdrachtgever
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Auteur
Martha Deen, Joeri Vendrik

Nagekeken door
Frans Rooijers

Disclaimer

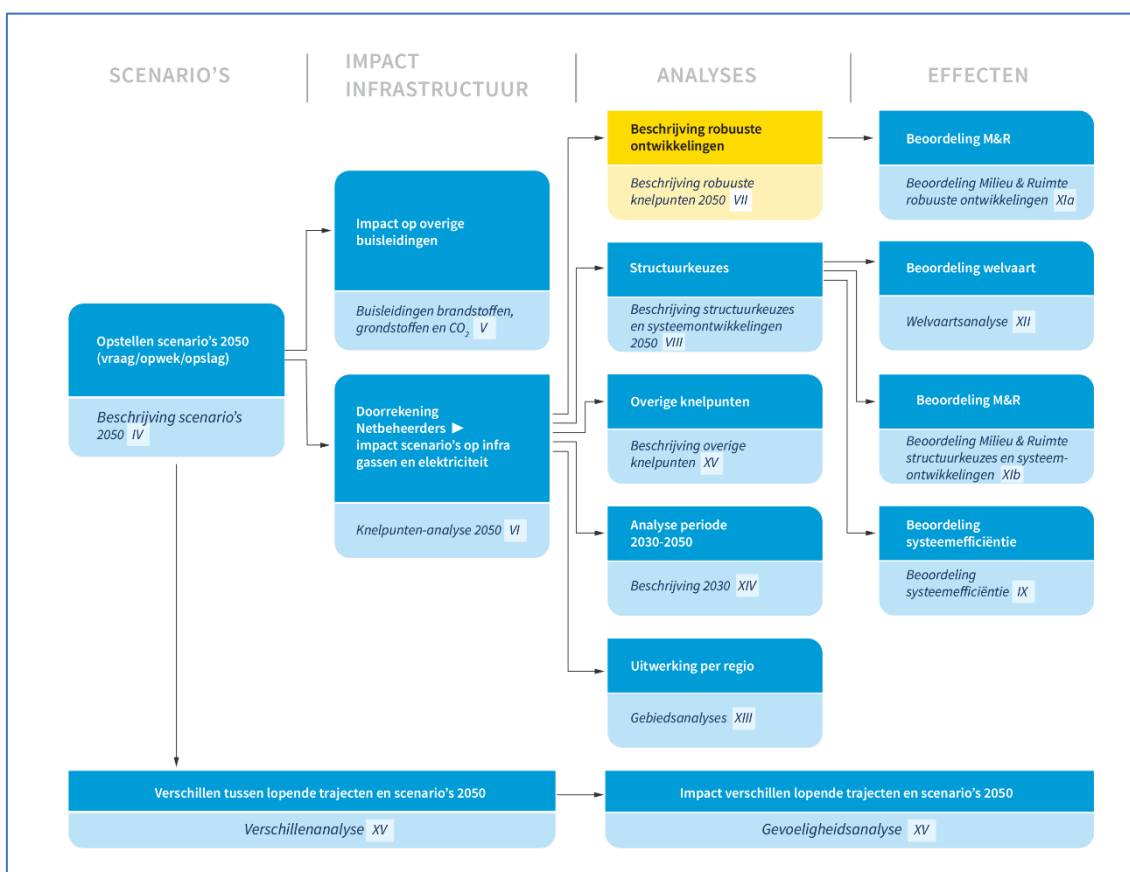
In het onderzoek is gebruikgemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid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



0 Samenvatting

In deze Bijlage VII, *Beschrijving robuuste knelpunten en ontwikkelingen 2050*, worden de ontwikkelingen besproken die plaatsvinden in elk van de scenario's voor 2050. Het is zeer waarschijnlijk dat in de toekomst ruimte nodig is om deze ontwikkelingen te faciliteren, aangezien deze ontwikkelingen in elk van de scenario's plaatsvinden. Voor het bepalen van de robuuste ontwikkelingen worden de invulling van de scenario's (Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*) en de resultaten van de doorrekeningen van de netbeheerders (Bijlage VI *Knelpuntenanalyse 2050*) gebruikt. De beschrijving van de robuuste ontwikkelingen valt onder de fase Analyse in Figuur 0.1 met de samenhang van de bijlagen. De robuuste ontwikkelingen worden beoordeeld op het thema Milieu & Ruimte in Bijlage XIa *Beoordeling Milieu & Ruimte (Robuuste) ontwikkelingen*.

Figuur 0.1 - Overzicht en samenhang bijlagen IEA PEH



Inhoudsopgave

0	Samenvatting	1
1	Inleiding	3
1.1	Introductie	3
1.2	Scope	3
2	Elektriciteit	4
2.1	Productie	4
2.2	Opslag	5
2.3	Infrastructuur	7
3	Gassen (waterstof en methaan)	23
3.1	Productie waterstof en methaan	23
3.2	Opslag	24
3.3	Infrastructuur	25
4	Overige buisleidingen	33
5	Bovenregionaal warmtetransport	33
6	Totaaloverzicht	34
7	Bronnen	35
A.	Oplossingsrichtingen elektriciteit	36
B.	Oplossingsrichtingen waterstof	39

1 Inleiding

1.1 Introductie

Om te bepalen hoe het energiesysteem er in 2050 uitziet en welke (ruimtelijke) keuzes hierin gemaakt kunnen worden zijn er zeven scenario's opgesteld voor de Integrale Effectenanalyse van het Programma Energiehoofdstructuur. Vier scenario's, de Nederland Energieland-scenario's, zijn direct overgenomen vanuit de integrale infrastructuurverkenning II3050 (Netbeheer Nederland, 2021). Daarnaast zijn er twee ruimtelijke varianten toegevoegd op de II3050-scenario's, dit zijn de Sterke Knopen-scenario's. Tot slot is er één scenario met kernenergie toegevoegd. Dit wordt het Zeer Sterke Knopen-scenario genoemd. De scenario's worden uitgebreid omschreven in Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*.

In de zeven scenario's die gehanteerd worden, zijn er aannames gemaakt over de ontwikkeling van vraag en hernieuwbaar aanbod van energie in 2050, opgesplitst naar sector, energiedrager en locatie (zie Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*). Vervolgens hebben de netbeheerders berekend hoeveel regelbare centrales, opslag en conversie noodzakelijk is voor een robuust energiesysteem en waar knelpunten optreden in de nationale energie-infrastructuur die een oplossing behoeven (zie Bijlage VI *Knelpuntenanalyse 2050*). Hierin is de methodologie die door de netbeheerders is ontwikkeld voor II3050 gebruikt (Netbeheer Nederland, 2021).

De doorrekening van de netbeheerders leidt tot een overzicht van verwachte ontwikkelingen in het hoogspanningsnet en het landelijke gastransportnet in elk van de scenario's voor 2050, maar ook van grootschalige productie- en opslaglocaties die nodig zijn in 2050.

1.2 Scope

In de analyses worden twee soorten ontwikkelingen geïdentificeerd:

- **Robuuste ontwikkelingen** die in alle scenario's optreden¹. Het is dus zeer waarschijnlijk dat hier in de toekomst ruimte voor moet worden gevonden. Voor elk van de robuuste ontwikkelingen zal er een beoordeling op hoofdlijnen gemaakt worden van de benodigde ruimte en effecten op milieu en ruimte.
- **Specifieke ontwikkelingen**. Deze ontwikkelingen vinden alleen plaats als bepaalde keuzes (structuurkeuzes) gemaakt worden. Deze worden behandeld in Bijlage VIII *Beschrijving structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050*.

Deze bijlage bevat een beschrijving van het eerste soort ontwikkelingen, de robuuste ontwikkelingen. In deze bijlage zijn robuuste ontwikkelingen geïdentificeerd tot en met 2050. Hierbij wordt onderscheid gemaakt naar productie (regelbaar/niet-regelbaar, elektriciteit/gas/warmte), opslag en energie-infrastructuur (elektriciteit, gassen, overige buisleidingen en warmte).

Deze bijlage richt zich op het technische en energetische aspect. De ruimtelijke analyse van de robuuste ontwikkelingen volgt in Bijlage XIa *Beoordeling Milieu & Ruimte (Robuuste) ontwikkelingen*. Voorziene ontwikkelingen voor overige ondergrondse buisleidingen (naast de gasleidingen) worden toegelicht in Bijlage V *Buisleidingen brandstoffen, grondstoffen en CO₂*.

¹ Deze scenario's zijn op basis van 1 weerprofiel (het jaar 1987). Het variëren van het weerprofiel kan leiden tot andere vraag-, aanbod- en opslagprofielen.

2 Elektriciteit

2.1 Productie

In het toekomstige energiesysteem wordt het grootste gedeelte van de elektriciteit geproduceerd met hernieuwbare bronnen zoals wind op land, windenergie op zee en zon-pv. Daarnaast zijn er regelbare energiecentrales nodig om elektriciteit te produceren op momenten met weinig wind en zon.

In de analyses wordt alleen ingegaan op locaties voor regelbare energiecentrales. Het PEH gaat namelijk niet over de aanwijzing van hernieuwbare opwek op land. Daarnaast kijkt het PEH alleen naar benodigde ruimte op land, dus opweklocaties van windenergie op zee vallen ook buiten de scope. Er wordt gekeken naar benodigde opslag en energie-infrastructuur op land veroorzaakt door hernieuwbare opwek op land en aanlanding van windenergie op zee (in paragrafen 2.2 en 2.3).

Regelbare centrales

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 zelfs toe, van ongeveer 20 GW nu naar 33 tot 36 GW in 2050. Deze centrales zullen echter wel fors minder draaiuren maken dan de huidige centrales, waardoor de totale productie lager ligt.

De regelbare centrales draaien in de scenario's op waterstof of groengas. Er zijn verschillende soorten regelbare centrales nodig. Er zijn grootschalige CCGT²-centrales nodig die relatief veel draaiuren maken en een hogere efficiëntie hebben. Het is de verwachting dat deze centrales op de bestaande Barro-locaties komen³. Daarnaast zijn piekeenheden nodig (OCGT of GT⁴) die bijspringen op momenten van forse tekorten en daarmee minder draaiuren maken. Dit type regelbare centrale heeft een lagere efficiëntie. Deze centrales kunnen geplaatst worden op de Barro-locaties, maar het is ook een optie dat dit kleinschalige eenheden worden die verspreid over het land komen te staan.

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

Tabel 2.1 geeft een overzicht van het robuust minimum aan regelbaar vermogen dat nodig is per Barro-locatie. Dit komt overeen met het minimum van alle zeven scenario's per locatie. Dus met de situatie dat er alleen grote regelbare centrales op deze locaties komen en dat het benodigde piekvermogen ingevuld wordt met kleinschalige eenheden verspreid over het land. Daarnaast geeft de tabel per Barro-locatie het

² Combined Cycle Gas Turbine.

³ Er zijn specifieke criteria waaraan locaties voor grote regelbare centrales moeten voldoen. Zo moet er onder meer voldoende koelwater beschikbaar zijn en moet er een aansluiting zijn op het hoogspanningsnet. Door deze criteria is het de verwachting dat er geen nieuwe locaties voor grote regelbare centrales bijkomen, maar dat hiervoor de bestaande Barro-locaties gebruikt worden. Dit zijn locaties die vanuit het Besluit algemene regels ruimtelijke ordening aangewezen zijn voor grootschalige elektriciteitscentrales.

⁴ Open Cycle Gas Turbine of Gasturbine.

maximale vermogen van alle scenario's, dit komt overeen met de situatie dat ook piekeenheden op de Barro-locaties geplaatst worden (bovenstaande keuze wordt verder uitgewerkt in structuurkeuze 4, zie Bijlage VIII *Beschrijving structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050*).

De tabel geeft ook het huidige vermogen op de locaties ter referentie.

Locaties regelbare centrales

De verdeling van totale vermogen aan regelbare centrales over de verschillende Barro-locaties in de scenario's gebaseerd is gebaseerd op aannames (zie Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*). Deze verdeling hoeft ruimtelijk en energetisch gezien niet optimaal te zijn, aangezien er geen optimalisaties uitgevoerd zijn. Er kan geschoven worden in de verdeling over de locaties, maar de totale opgave moet wel ingevuld worden binnen deze locaties.

Tabel 2.1 - Robuust vermogen regelbare centrales

Gebied	Robuust minimum	Maximum scenario's	Huidig	Eenheid
Amsterdam (Hemweg)	450	4.550	450	MW
Borssele/Sloegebied	1.050	1.700	850	MW
Buggenum	100	650	0	MW
Burgum	650	1.100	650	MW
Delfzijl	550	950	550	MW
Diemen	550	750	700	MW
Eemshaven	4.200	8.750	3300	MW
Flevoland/Lelystad	550	900	850	MW
Geertruidenberg (Amercentrale)	400	900	650	MW
Geleen (Graetheide)	300	1350	250	MW
Maasbracht	1.100	3.650	1300	MW
Moerdijk	550	900	750	MW
Rotterdam Botlek	550	1.250	450	MW
Rotterdam Maasvlakte	2.050	7.050	2650	MW
Rotterdam RoCa	150	300	250	MW
Rotterdam Vondelingenplaat	500	800	800	MW
Terneuzen, Sas van Gent	400	700	350	MW
Utrecht Lage Weide	300	550	550	MW
Velsen	550	900	950	MW

2.2 Opslag

Om vraag en aanbod te balanceren is opslag van elektriciteit met batterijen noodzakelijk. Deze batterijen worden ingezet om kortetermijnnonbalans tussen vraag en aanbod van elektriciteit op te vangen. De tijdschaal van de inzet van de batterijen is enkele uren⁵. Batterijen zijn niet geschikt voor het opvangen van langetermijnnonbalans tussen vraag en aanbod. Hier worden elektrolyzers (bij aanbodoverschot, wordt behandeld in paragraaf 3.1) en regelbare centrales (bij aanbodtekort, wordt behandeld in paragraaf 2.1) voor ingezet.

Locatie batterijen in net

In de modellering (voor de berekeningen) zijn de batterijen geplaatst bij hoogspanningsstations en koppelpunten tussen het hoogspanningsnet en regionale netten. In de praktijk kunnen batterijen ook lager in het net geplaatst worden. Dit maakt voor de belasting op het hoogspanningsnet niet uit, indien het vermogen aan batterijen per voorzieningsgebied van een station gelijk blijft. Maar dit is wel relevant voor de ruimte die noodzakelijk is bij de hoogspanningsstations. In de analyse wordt de maximale ruimte bepaald die nodig is voor batterijen bij hoogspanningsstations, aangezien er in de analyses wordt aangenomen dat alle batterijen op dat niveau geplaatst worden.

⁵ Hiermee wordt bedoeld dat een batterij enkele uren achter elkaar kan opladen of ontladen en daarmee alleen overschotten of tekorten van enkele uren achter elkaar kan opvangen.

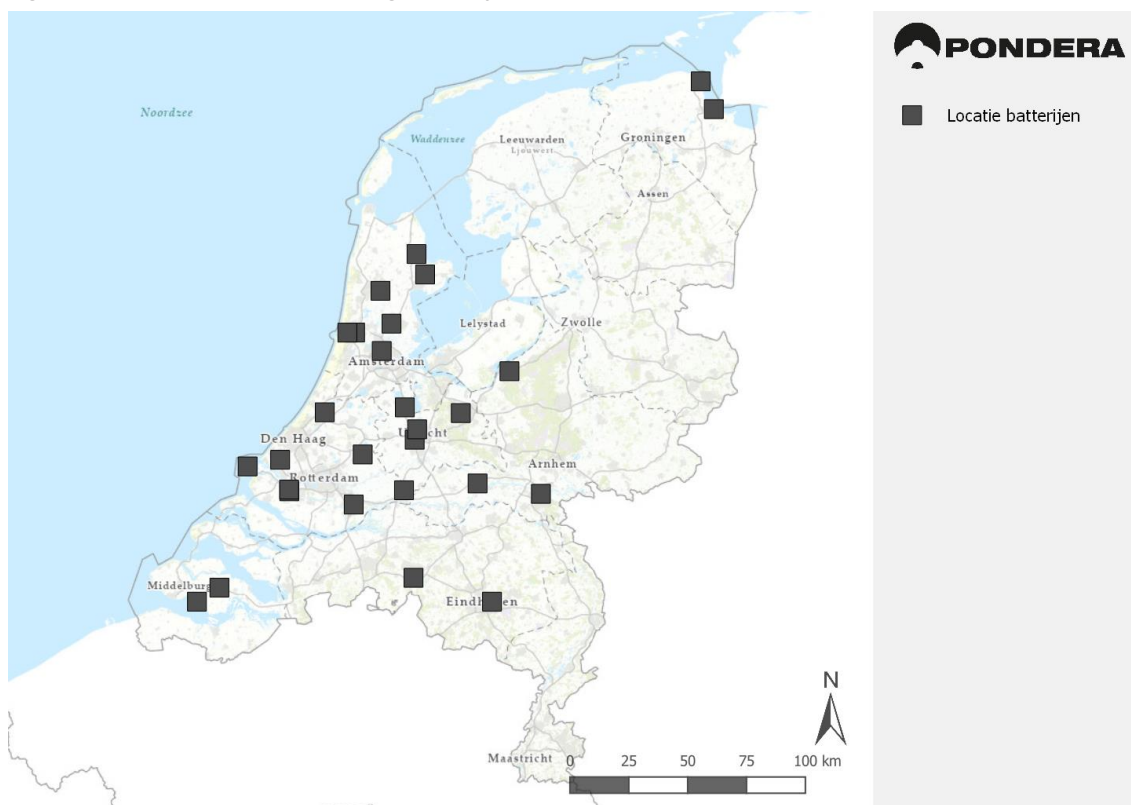
In de modellering worden de batterijen geplaatst bij hoogspanningsstations (zie bovenstaand kader). Per hoogspanningsstation wordt bepaald hoeveel vermogen aan batterijen noodzakelijk is om de lokale kortetermijnnonbalans tussen vraag en aanbod op te vangen. Uit deze analyse volgt dat er vooral veel batterijen nodig zijn op locaties met veel hernieuwbare opwek, vanwege de grote variabiliteit in de productie van deze bronnen. Dus bij aanlandingspunten van windenergie op zee en bij hernieuwbare opwek op land.

Tabel 2.2 geeft een overzicht van het robuuste minimum aan batterijen dat nodig is per hoogspanningsstation. Dit komt per locatie overeen met het scenario met het laagste benodigde vermogen. Daarnaast geeft de tabel het maximale vermogen van alle scenario's. In deze tabel worden alleen hoogspanningsstation meegenomen met een robuust minimum aan batterijen van minimaal 100 MW.

Tabel 2.2 - Robuust vermogen batterijen

Station	Robuust minimum	Maximum scenario's	Eenheid
Delfzijl Oosterhorn 220	150	750	MW
Station Harderwijk 150	150	400	MW
Station Nijmegen 150	100	300	MW
Station Tiel 150	100	300	MW
Station Soest 150	150	400	MW
Station Utrecht Lage Weide 150	150	450	MW
Station Oudenrijn 150	100	300	MW
Station Oterleek 150	150	550	MW
Station Amsterdam Hemweg 150	150	350	MW
Station Beverwijk 380	1.100	2.100	MW
Station Westwoud 150	200	950	MW
Station Velsen 150	150	450	MW
Station Dordrecht Noordendijk 150	150	300	MW
Station Gouda 150	150	400	MW
Station Leiden 150	100	300	MW
Station Botlek 150	300	600	MW
Maasvlakte-Amaliahaven 380	2.850	7.350	MW
Station Borssele/Slogebied 380	650	3.250	MW
Station Goes de Poel 150	100	600	MW
Station Arkel 150	100	300	MW
Station Eindhoven 380	100	200	MW
Station Tilburg Zuid 150	150	400	MW
Station Wijdewormer 150	200	450	MW
Eemshaven 380 kV	1.800	4.300	MW
Station Westerlee 150	150	200	MW
Station Breukelen 150	100	300	MW
Station Agriport 150 (Middenmeer)	750	6.300	MW
Station Geervliet Noordijk 150	150	400	MW

Figuur 2.1 - Locaties van robuust vermogen batterijen



2.3 Infrastructuur

De robuuste ontwikkelingen worden bepaald bij de hoogspanningsinfrastructuur op basis van doorrekeningen van de zeven scenario's door TenneT. In deze doorrekeningen wordt bepaald of de huidige infrastructuur voldoende capaciteit heeft om alle elektriciteit van producent naar afnemer te transporteren, op elk moment van het jaar. Indien dit niet zo is dan is sprake van een knelpunt. De ernst van de knelpunten is afhankelijk van de hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden door een bepaald onderdeel van het hoogspanningsnet. Deze parameter heet ENT⁶ en omvat zowel de omvang als de duur van een overschrijding. Bij zware knelpunten moeten nieuwe hoogspanningsinfrastructuur aangelegd worden (later in deze paragraaf volgt meer informatie over wanneer dit noodzakelijk is).

Bij de knelpuntenanalyse wordt er aangenomen dat de huidige investeringsplannen gerealiseerd worden. De voorgestelde investeringen uit het Investeringsplan van 2020 zijn reeds meegenomen in het netmodel en komen dus ook niet naar voren uit de knelpuntenanalyse⁷.

⁶ Energy Not Transported.

⁷ Ondertussen is al een nieuw investeringsplan van TenneT uitgekomen, het IP2022. Hier zijn nieuwe investeringen en plannen in opgenomen. Een deel van de knelpunten die volgen uit de analyses zijn ook al signaleerd in het nieuwe investeringsplan. Indien dit het geval is, wordt dit benoemd.

Welke componenten worden meegenomen?

Voor hoogspanningsinfrastructuur worden zowel verbindingen als stations beschouwd.

Bij de verbindingen wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende spanningsniveaus van het hoogspanningsnet; 380 kV, 220 kV, 150 kV en 110 kV. De oplossingsrichtingen, de kosten en het ruimtebeslag kunnen namelijk verschillen per spanningsniveau.

Hoogspanningsstations kunnen uit verschillende componenten bestaan:

- transformatoren om de elektriciteit om te zetten naar een ander spanningsniveau (bijvoorbeeld 380 kV naar 150 kV);
- velden om afnemers of producenten aan te sluiten of om verbindingen aan te sluiten;
- overige elektrotechnische componenten, zoals rails.

Er wordt geanalyseerd hoeveel nieuwe transformatoren nodig zijn en hoeveel extra nieuwe velden geplaatst moeten worden voor het aansluiten van nieuwe afnemers, producenten of verbindingen. Hierbij wordt ook weer onderscheid gemaakt naar spanningsniveau. Bij 380kV- en 220kV-stations worden individuele stations geanalyseerd. Bij 150kV- en 110kV- stations wordt alleen geanalyseerd hoeveel ruimte in totaal nodig is voor nieuwe componenten, aangezien het aantal stations hier te groot is voor individuele analyses.

Welke uitbreidingen zijn gepland tot 2030?

In de analyses wordt gekeken naar de nieuwe infrastructuur die nodig is tot 2050. Maar tot 2030 staan al een flink aantal nieuwe investeringen op de planning. Deze zijn opgenomen in de investeringsplannen van TenneT. In de analyses wordt aangenomen dat de geplande projecten uit de investeringsplannen gerealiseerd gaan worden. Deze zijn dus in principe ook 'robust'. Voor de doorrekeningen zijn de investeringen tot 2030 uit het investeringsplan IP2020 meegenomen in het netmodel⁸. Dit betekent dat er doorrekeningen gedaan worden met het hoogspanningsnet dat er naar verwachting ligt in 2030⁹.

De knelpunten die tot 2030 optreden komen dus ook niet naar voren in de doorrekening van 2050.

In Tabel 2.3 staat een overzicht van de geplande uitbreidingen van het hoogspanningsnet tot 2030 die meegenomen zijn in het netmodel (maar nu nog niet gerealiseerd zijn). In onderstaand overzicht zijn alle uitbreidingen voor 380 kV en 220 kV en de belangrijkste uitbreidingen voor 150 kV en 110 kV meegenomen. In de aparte bijlage over 2030 wordt in meer detail ingegaan op de ontwikkelingen tot 2030 in, onder meer op de ruimtelijke gevolgen.

⁸ Zoals eerder benoemd is er ondertussen al een nieuw investeringsplan uitgekomen, het IP2022. De additionele investeringen en plannen die hierin staan zijn niet meegenomen in het netmodel en komen dus wel naar voren in de knelpuntenanalyse. Indien dit het geval is, wordt dit benoemd.

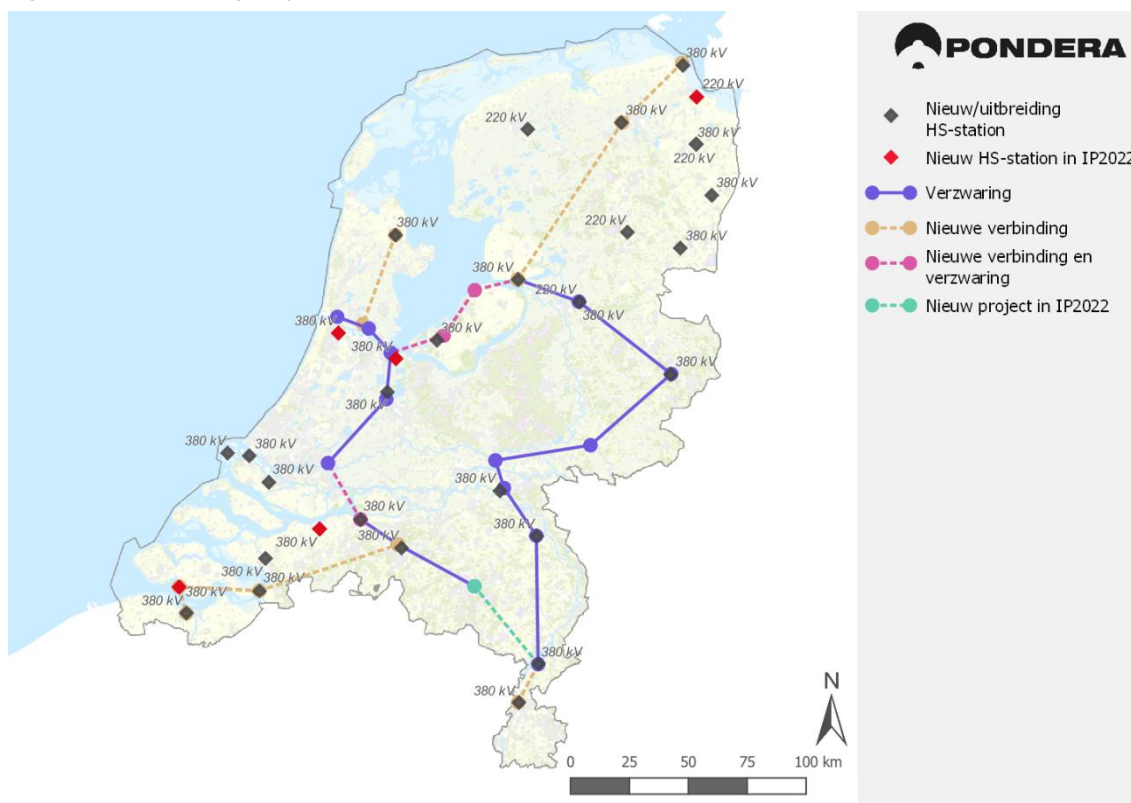
⁹ Voor een aantal projecten is de verwachte inbedrijfname verlaat tot vlak na 2030 in het laatst gepubliceerde investeringsplan, het IP2022.

Tabel 2.3 - Geplande uitbreidingen hoogspanningsnet tot 2030

Type asset	Naam	Type investering
380kV-station	Tilburg	Nieuw station
380kV-station	Ter Apelkanaal	Nieuw station
380kV-station	Veenoord Boerdijk	Nieuw station
380kV-station	Verzwarend kop van Noord-Holland	Nieuw station
380kV-station	Graetheide	Nieuw station
380kV-station	Wijchen	Nieuw station
380kV-station	Almere	Nieuw station
380kV-station	Kijkuit	Nieuw station
380kV-station	Europoort	Nieuw station
380kV-station	Maasvlakte Amaliahaven	Nieuw station
380kV-station	Eemshaven	Uitbreiding station
380kV-station	Simonshaven	Uitbreiding station
380kV-station	Geertruidenberg	Uitbreiding station
380kV-station	Rilland	Uitbreiding station
380kV-station	Boxmeer	Uitbreiding station
380kV-station	Meeden	Uitbreiding station
380kV-station	Maasbracht	Uitbreiding station
220kV-station	Meeden	Uitbreiding station
380kV-verbinding	Eemshaven Oudeschip-Vierverlaten	Nieuwe verbinding
380kV-verbinding	Rilland-Tilburg	Nieuwe verbinding
380kV-verbinding	Vierverlaten-Ens	Nieuwe verbinding
380kV-verbinding	Verzwarend kop van Noord-Holland	Nieuwe verbinding
380kV-verbinding	Maasbracht-Graetheide	Nieuwe verbinding
380kV-verbinding	Zuid-Beveland - Terneuzen	Nieuwe verbinding
380kV-verbinding	Lelystad-Diemen	Extra circuit(s) bij bestaande verbinding
380kV-verbinding	Ens-Lelystad	Extra circuit(s) bij bestaande verbinding
380kV-verbinding	Krimpen ad IJssel-Geertruidenberg	Extra circuit(s) bij bestaande verbinding
380kV-verbinding	Borssele/Sloegebied-Rilland	Extra circuit(s) bij bestaande verbinding
380kV-verbinding	Hengelo-Zwolle	Verzwarend
380kV-verbinding	Ens-Zwolle	Verzwarend
380kV-verbinding	Eindhoven-Tilburg-Geertruidenberg	Verzwarend
380kV-verbinding	Eindhoven-Maasbracht	Verzwarend
380kV-verbinding	Geertruidenberg-Krimpen	Verzwarend
380kV-verbinding	Krimpen-Breukelen-Diemen-Oostzaan-Beverwijk	Verzwarend
380kV-verbinding	Lelystad-Ens	Verzwarend
380kV-verbinding	Diemen-Lelystad	Verzwarend
380kV-verbinding	Doetinchem-Hengelo	Verzwarend
380kV-verbinding	Dodewaard-Doetinchem	Verzwarend
380kV-verbinding	Maasbracht-Boxmeer-Dodewaard	Verzwarend
150/110kV-verbindingen		Implementatie pocketstructuur
Interconnectie		Uitbreiding interconnectiecapaciteit naar 15 GW ¹⁰

¹⁰ Op enkele van deze locaties wordt de interconnectiecapaciteit verhoogd conform bestaande plannen. Daarnaast wordt aangenomen dat er extra interconnectiecapaciteit komt met het Britse hoogspanningsnet via windparken op de Noordzee.

Figuur 2.2 - Ontwikkelingen op het elektriciteitsnetwerk tot 2030



In Tabel 2.3 wordt er onderscheid gemaakt naar de volgende types investeringen:

- **Nieuw station.** Er wordt een compleet nieuw station ontwikkeld op een locatie waar nu nog geen station aanwezig is.
- **Uitbreiding station.** Een bestaand station wordt uitgebreid, bijvoorbeeld met nieuwe velden, transformatoren of rails.
- **Nieuwe verbinding.** Er wordt een nieuwe hoogspanningsverbinding aangelegd op een tracé waar nu nog geen hoogspanningsverbinding loopt. Bij 380 kV en 220 kV gaat dit om een bovengrondse verbinding.
- **Extra circuit(s) bij bestaande verbinding.** Er worden één of meerdere nieuwe circuits aangelegd op een traject waar nu al een verbinding loopt. Hiervoor zijn nieuwe masten nodig. Dit parallel aan de verbinding of via een nieuw tracé.
- **Verzwaring.** De geleiders van bestaande verbindingen worden opgewaardeerd naar 4kA¹¹-geleiders, waardoor deze meer elektriciteit kunnen transporteren. Deze maatregel heeft geen significante ruimtelijke consequenties, maar wel financiële consequenties.
- **Implementatie pocketstructuur.** In haar 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. Op deze manier is er minder transport via de lagere spanningsniveaus noodzakelijk doordat de stroom snel afgevoerd kan worden naar het 380kV- of 220kV-net. In het

¹¹ Kilo-Ampère.

netmodel is de pocketstructuur voor het gehele 150kV- en 110kV-net meegenomen, behalve in de kop van Noord-Holland en de regio Rotterdam¹².

Voor de invoering van de pocketstructuur zijn nieuwe 380kV-stations en uitbreidingen van bestaande 380kV-stations nodig. Deze zijn al opgenomen in bovenstaande lijst (onder nieuwe stations en uitbreiding stations). Daarnaast moeten 150kV- en 110kV-verbindingen 'opgeknijpt' worden. Dit heeft geen significante ruimtelijke impact.

Voor het aansluiten van nieuwe windparken op zee zijn nieuwe velden nodig bij 380kV-stations. Er wordt aangenomen dat de investeringen in het IP2020 voldoende zijn om de hoeveelheid windenergie op zee uit het meest ambitieuze scenario van het investeringsplan aan te sluiten. Het gaat daarin om 14,6 GW.

In de scenario's van het investeringsplan worden ook aannames gedaan dat er forse hoeveelheden elektrolyzers en batterijen komen richting 2030. De nieuwe velden die nodig zijn om dit aan te sluiten zijn nog niet meegenomen in het investeringsplan, aangezien hiervoor pas een investeringsbeslissing wordt genomen bij een concrete klantaanvraag.

Wat zijn robuuste knelpunten na 2030?

Welke knelpunten zijn er voor de verschillende scenario's?

Energy not transported (ENT)

Om de ernst van de knelpunten te bepalen wordt de graadmeter Energy Not Transported (ENT) gehanteerd. Dat is de totale hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden door een bepaalde asset. Deze graadmeter is een combinatie van de ernst (MW overschrijding) en de duur (aantal uur) van knelpunten. TenneT gebruikt deze graadmeter om een afweging te maken tussen redispatch¹³ en investeren in nieuwe infrastructuur. In bijlage A worden stelregels hiervoor gegeven.

Er wordt aangenomen dat de geleiders van alle 380kV-verbindingen opgewaardeerd zijn naar 4kA. Hierdoor hebben de verbindingen meer transportcapaciteit. Bij het oplossen van een knelpunt is het opwaarderen van de geleider de eerste stap aangezien dit geen ruimtelijke implicaties heeft. TenneT verwacht dat ze op den duur de geleiders van bijna het complete 380kV-net opwaarderen naar 4kA.

De netbeheerders hebben in hun doorrekening bepaald op welke plekken in het hoogspanningsnet knelpunten plaatsvinden na 2030 doordat niet alle energie getransporteerd kan worden van de productielocatie naar de afnemer. Voor elk knelpunt is een oplossing noodzakelijk. Het is echter niet zo dat elke oplossing van knelpunten een (aanzienlijke) ruimtelijke impact heeft. Het is mogelijk om een deel van deze knelpunten op te lossen met (relatief) geringe ruimtelijke impact door middel van redispatch of door verzwaring¹⁴. Alleen als een forse hoeveelheid energie op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (en de ENT dus hoog is) zijn infrastructuraanpassingen met aanzienlijke ruimtelijke impact noodzakelijk, zoals

¹² Ten tijde van het opstellen van het netmodel was het nog onduidelijk hoe de pocketstructuur in die regio's eruit moest gaan zien.

¹³ 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.

¹⁴ Bij verzwaring worden de geleiders van bestaande verbindingen opgewaardeerd naar 4kA-geleiders, waardoor deze meer elektriciteit kunnen transporteren. Deze maatregel heeft geen significante ruimtelijke consequenties, maar wel financiële consequenties. Er wordt aangenomen dat alle 380kV-verbindingen verzwakt worden richting 2050. Dit is conform de plannen van TenneT.

het aanleggen van een nieuwe hoogspanningsverbinding, het plaatsen van een nieuwe transformator of het implementeren van een nieuwe of kleinere pockets. Een uitgebreide omschrijving van de oplossingsrichtingen is te vinden in bijlage A.

Elk knelpunt krijgt een classificatie om te bepalen hoe groot het risico op een ruimtelijke ingreep is. Deze classificatie is gebaseerd op de hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (ENT)¹⁵. De verschillende classificaties zijn in de figuren aangegeven met kleuren.

De onderstaande classificaties worden gehanteerd:

- **Geen knelpunt (groen).** Op elk moment van het jaar kan alle elektriciteit getransporteerd worden. Er is dus geen oplossing nodig.
- **Licht knelpunt (geel).** Op enkele momenten in het jaar kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Maar dit kan hoogstwaarschijnlijk opgelost worden zonder ruimtelijke ingreep.
- **Middelgroot knelpunt (oranje).** Op enkele momenten in het jaar kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Maar dit kan waarschijnlijk opgelost worden zonder ruimtelijke ingreep.
- **Zwaar knelpunt (rood).** Regelmatig kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Hiervoor is waarschijnlijk een ruimtelijke ingreep noodzakelijk.
- **Zeer zwaar knelpunt (paars).** Regelmatig kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Hiervoor is hoogstwaarschijnlijk een ruimtelijke ingreep noodzakelijk.

Deze classificaties worden voor elk spanningsniveau gehanteerd en zowel voor verbindingen als voor transformatoren (bij stations). De grenzen in termen van TWh ENT zijn vastgesteld in samenwerking met TenneT en zijn te vinden in bijlage A en in de figuren die volgen. Deze grenzen verschillen per spanningsniveau en type infrastructuur.

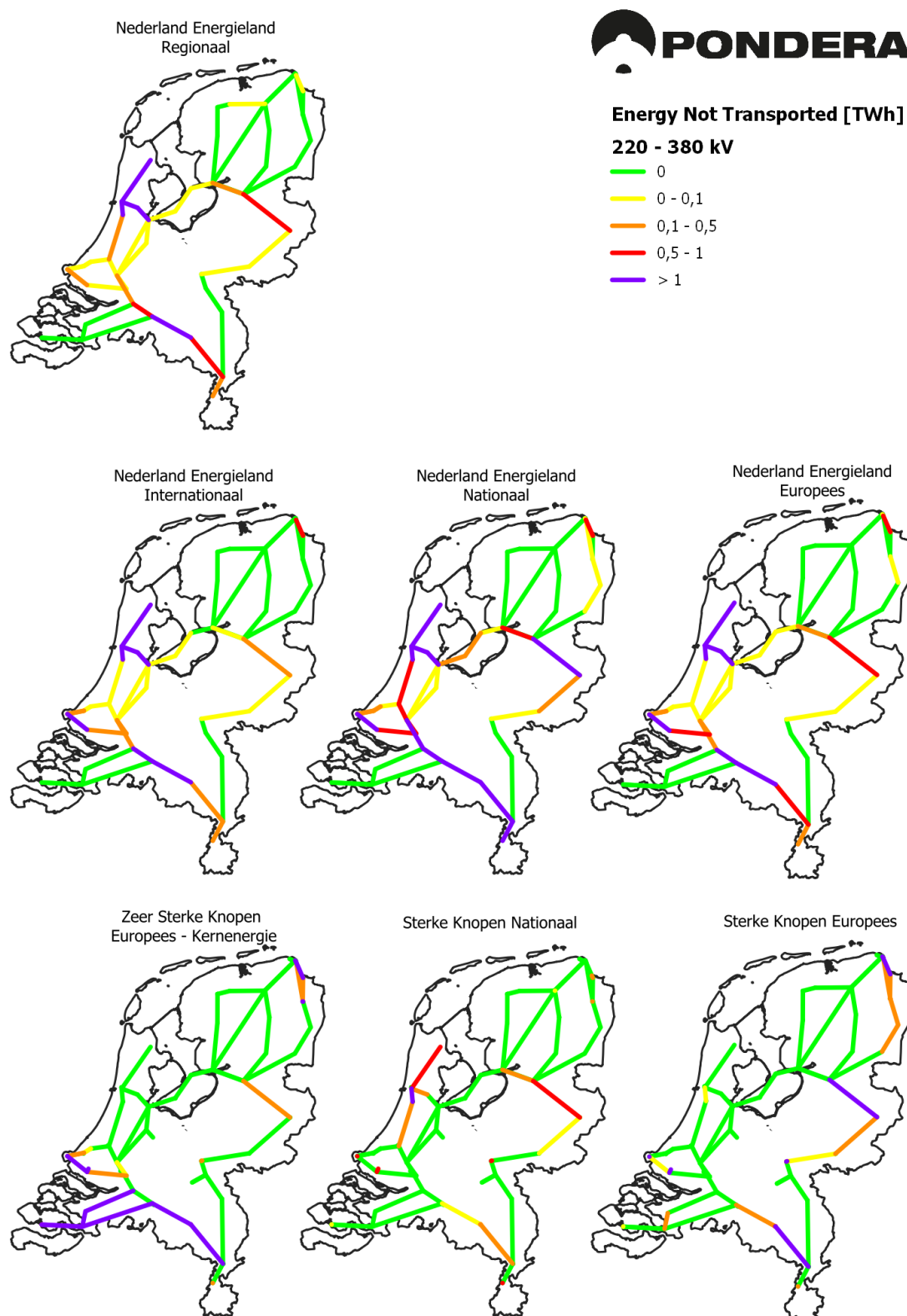
Hieronder volgt een korte samenvatting van de resultaten van de knelpuntenanalyse. In Bijlage VI *Knelpuntenanalyse 2050* wordt uitgebreider ingegaan op de doorrekeningen van TenneT en de knelpunten die er voor 2050 verwacht worden bij de hoogspanningsinfrastructuur.

380/220kV-verbindingen

Figuur 2.3 geeft een overzicht van de resultaten van de doorrekening van het 220kV- en 380kV-net, voor elk van de scenario's. De knelpunten op deze hoogste spanningsniveaus worden voornamelijk veroorzaakt door transport van elektriciteit van windparken op zee vanaf de kust naar vraag in het binnenland. Zo zie je in meerdere gevallen knelpunten rondom aanlandingspunten in Noord- en Zuid-Holland en zijn er in elk scenario knelpunten tussen Rotterdam en Maasbracht (vraag vanuit Chemelot en export Duitsland/België). Daarnaast zijn er in alle scenario's knelpunten rondom het interconnectiepunt bij Hengelo.

¹⁵ Hierbij wordt aangenomen dat alle 380kV-verbindingen uitgerust zijn met 4kA-geleiders (zie vorige voetnoot). Dit heeft effect op de capaciteit van de verbindingen en op de hoeveelheid energie die niet getransporteerd kan worden.

Figuur 2.3 - Resultaten knelpuntendoorrekening 380/220 kV voor het jaar 2050



150/110kV-verbindingen

Figuur 2.4 geeft een overzicht van de doorrekening van de 150kV- en 110kV-netten. In de doorrekening is meegenomen dat deze netten opgeknipt worden in deelnetten die aangesloten zijn op één 380kV- of 220kV-transformatorstation, de zogenaamde pocketstructuur (zie uitleg bij *Welke uitbreidingen zijn gepland tot 2030?*).

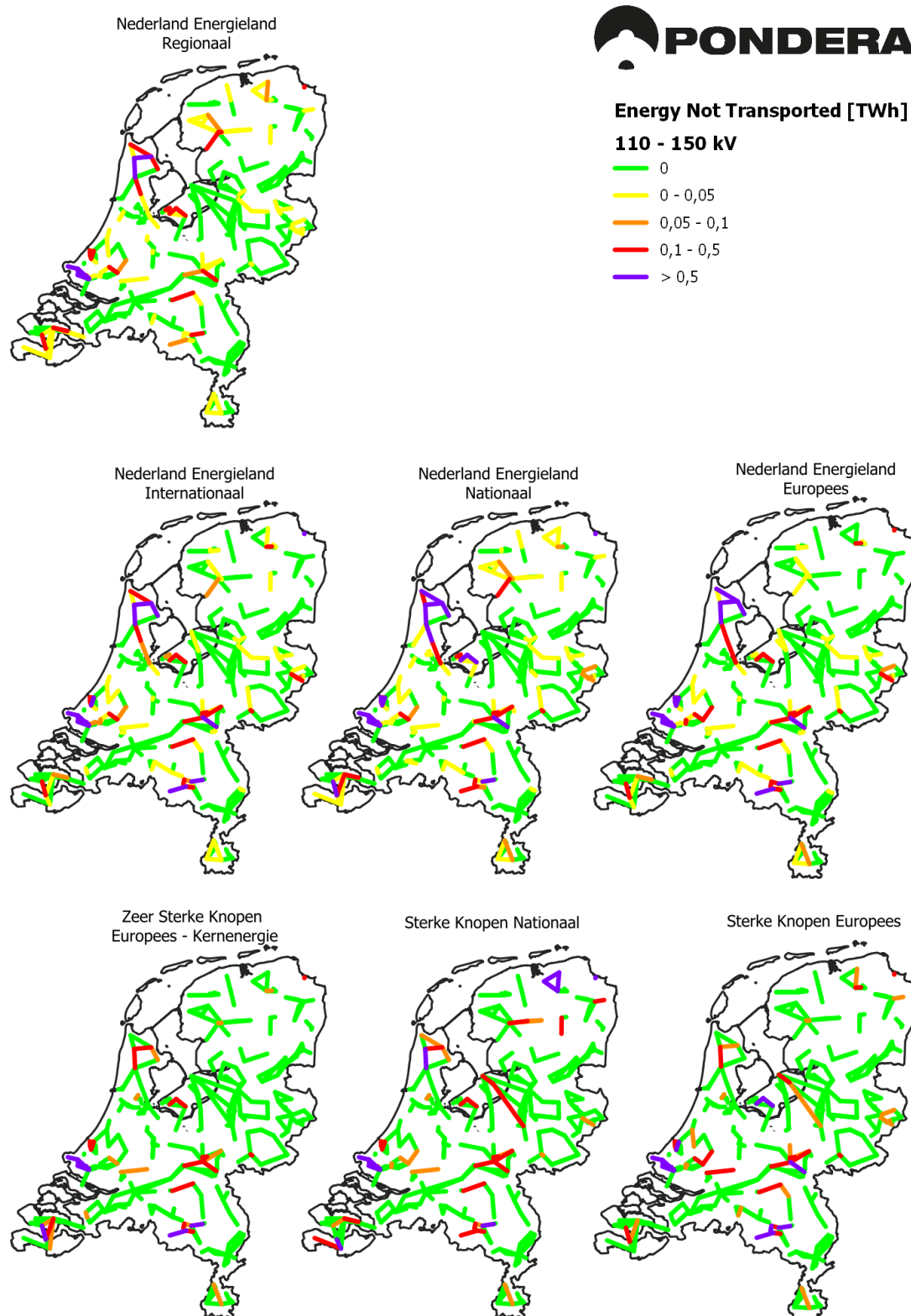
De pocketstructuur is in het huidige gehanteerde netmodel nog niet doorgevoerd in de kop van Noord-Holland en rondom Rotterdam. Ten tijde van het opstellen van het netmodel was het nog onduidelijk hoe de pocketstructuur in die regio's eruit moest gaan zien. Doordat de pocketstructuur in die regio's nog niet meegenomen is zie je daar in de verschillende scenario's veel knelpunten op het 150kV-net. Het is de verwachting van TenneT dat hier wel pockets gaan komen

In het algemeen zijn er relatief weinig knelpunten op deze spanningsniveaus. Dit komt onder meer door de pocketstructuur, waardoor overschotten van elektriciteit snel afgevoerd kunnen worden richting het 220kV- of 380kV-net. Daarnaast worden er grote vermogens aan batterijen aangenomen, die ingezet worden om de pieken van de opwek van wind en zon af te vlakken.

Effecten modellering batterijen

In de doorrekeningen zijn forse hoeveelheden batterijen (tot ruim 50 GW) meegenomen. Deze batterijen vangen een groot deel van de piekproductie van met name zonnepanelen (en in mindere mate windturbines op land) flink af. Dit is een belangrijke oorzaak voor het feit dat er amper knelpunten op het 110 kV en 150 kV uit de doorrekening komen. Het is echter maar de vraag of deze hoeveelheden batterijen er in de toekomst ook gaan komen en of dit rendabel is. Dit betekent dat het aantal knelpunten op deze spanningsniveaus mogelijk onderschat worden.

Figuur 2.4 - Resultaten knelpuntendoorrekening 150/110 kV voor het jaar 2050



Stations

Naast de verbindingen wordt er ook gekeken naar knelpunten bij stations. Stations hebben grofweg twee functies:

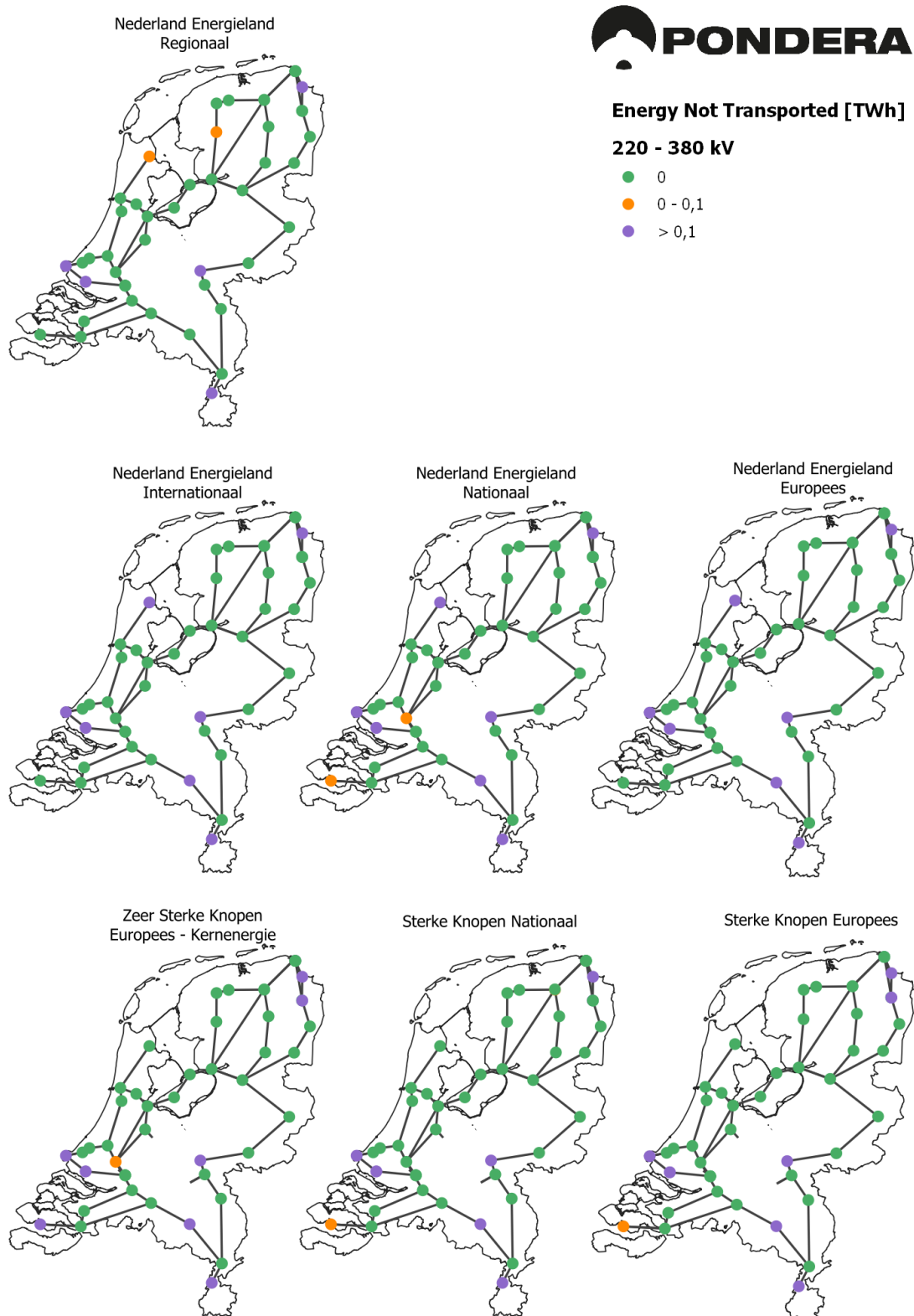
- het transformeren van elektriciteit naar een hoger of lager spanningsniveau door middel van transformatoren;
- het aansluiten van grote vragers, grote producenten of verbindingen.

Stations kunnen één van deze functies, maar ook beide functies hebben. Voor transformatoren en het aansluiten van grote vragers, grote producenten of verbindingen zijn velden nodig. Daarnaast zijn er op stations nog andere componenten noodzakelijk zoals rails. De beschikbare fysieke ruimte bij bestaande stations is beperkt, dus op een bepaald punt kan een station niet meer uitgebreid worden en moet een nieuw station gerealiseerd worden.

380/220kV-transformatoren

TenneT heeft de belasting en de knelpunten bij de 380kV- en 220kV-transformatoren berekend in de netdoorrekening. Figuur 2.5 geeft een overzicht van de resultaten hiervan.

Figuur 2.5 - Overzicht knelpunten stations

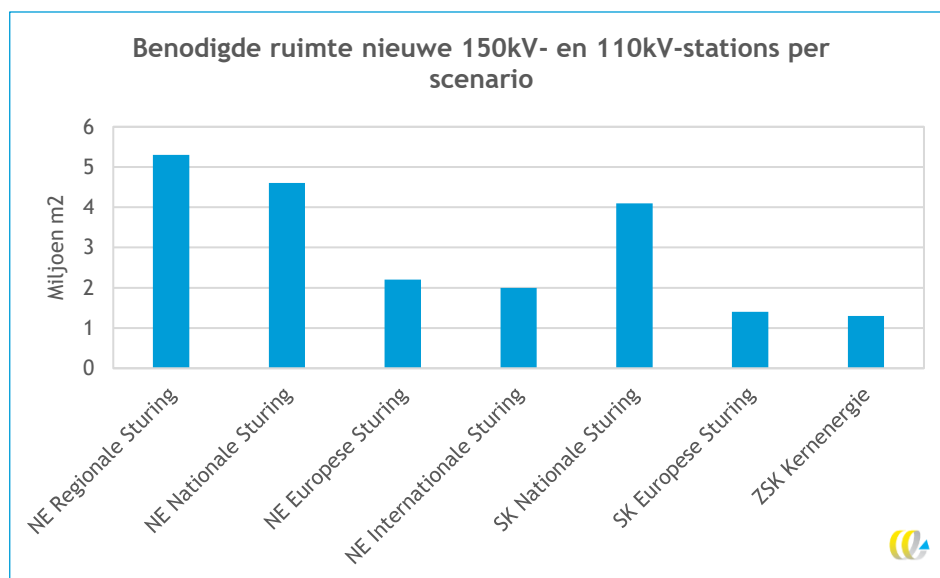


Er is geen doorrekening gemaakt van de velden die nodig zijn voor het aansluiten van grote vragers, producenten of voor verbindingen. Hiervoor is een afzonderlijke analyse gedaan. Het aantal velden dat noodzakelijk is hiervoor is bepaald op basis van de stelregels in bijlage A. De resultaten hiervan komen naar voren bij de volgende paragrafen over robuuste knelpunten en de uitwerking van de structuurkeuzes.

150/110kV-stations

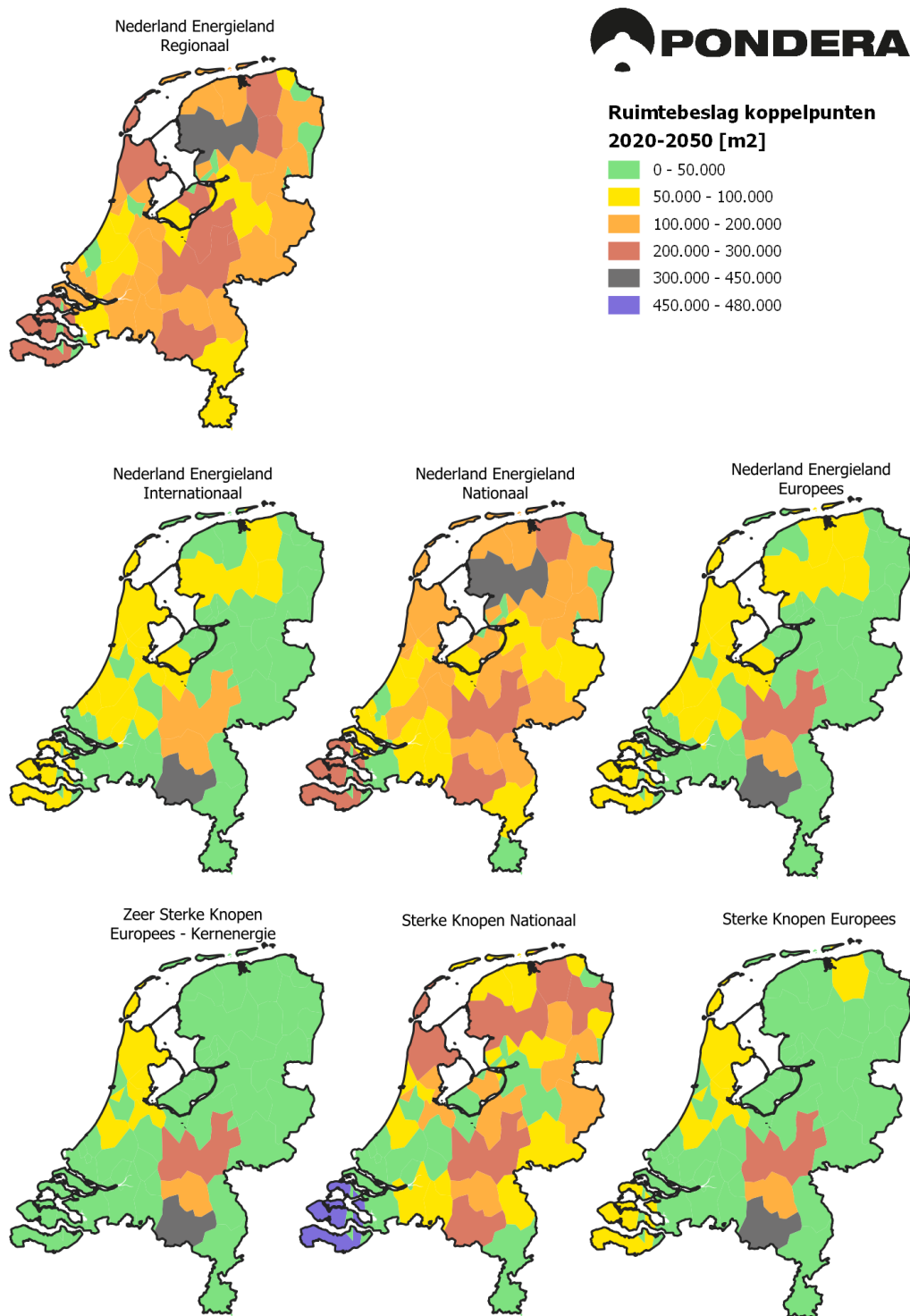
Voor 150kV- en 110kV-stations wordt niet gekeken naar individuele stations. Wel wordt een inschatting gemaakt van de totale ruimte die noodzakelijk is voor nieuwe stations. Hiervoor hebben de regionale netbeheerders een doorrekening gemaakt. Figuur 2.6 geeft een overzicht van de benodigde ruimte voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations per scenario. In de scenario's met de meeste hernieuwbare opwek (Nederland Energieland Regionale Sturing, en beide scenario's Nationale Sturing) is de meeste ruimte nodig voor nieuwe stations. In de Sterke Knopen- en Zeer Sterke Knopen-scenario's is minder ruimte nodig voor nieuwe stations door clustering van hernieuwbare opwek op land en toepassing van kernenergie.

Figuur 2.6 - Benodigde ruimte nieuwe 150kV- en 110kV-stations per scenario



Figuur 2.7 geeft een geografische uitsplitsing van de benodigde ruimte voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations.

Figuur 2.7 - Geografische uitsplitsing benodigde ruimte nieuwe 150kV- en 110kV-stations per scenario



Wanneer is een knelpunt robuust?

Een knelpunt wordt gedefinieerd robuust als deze in alle scenario's optreedt. Voor de effectanalyse in het thema Milieu & Ruimte wordt gezocht naar de ruimtelijk relevante ingrepen. Daarom wordt een knelpunt alleen robuust genoemd als er een grote kans is op een (aanzienlijke) ruimtelijke ingreep in alle scenario's.

Bij de 380/220kV-verbindingen wordt een knelpunt als robuust beschouwd als deze in alle scenario's optreedt en het knelpunt in elk scenario minimaal de classificatie 'middelgroot' heeft. Daarnaast moet het knelpunt minimaal vijf keer de classificatie 'zwaar' of 'zeer zwaar' hebben, wat betekent dat de kans op een ruimtelijke ingreep aanzienlijk is (zie toelichting classificatie bij *Welke knelpunten zijn er voor de verschillende scenario's?*). Voor de verbindingen in het 150/110kV-netwerk geldt dezelfde definitie, maar hier zijn de grenzen van de classificaties anders.

Bij de transformatoren van station wordt een knelpunt robuust genoemd als deze in alle scenario's optreedt en als er in minimaal vijf van de zeven scenario's sprake is van een knelpunt dat 'zwaar' of 'zeer zwaar' is (zie toelichting classificatie bij *Welke knelpunten zijn er voor de verschillende scenario's?*).

Wat zijn de robuuste ontwikkelingen bij verbindingen richting 2050?

Hieronder volgt een overzicht van de robuuste knelpunten bij de verbindingen van het hoogspanningsnet. Voor elk van deze knelpunten zijn uitbreidingen noodzakelijk, dit zijn robuuste ontwikkelingen. Bij de 220kV- en 110kV-verbindingen zijn geen robuuste ontwikkelingen.

Tabel 2.4 - Robuuste knelpunten verbindingen

Spanningsniveau	Verbinding	Toelichting
380 kV	Eindhoven-Maasbracht	Opgenomen in het nieuwe IP2022, maar nog niet in netmodel. Verbinding wordt gerealiseerd na 2030.
	Zwolle-Hengelo	Mogelijk veroorzaakt door beperkte modellering interconnectiepunten ¹⁶
150 kV	Eindhoven-Helmond Zuid	Pocketstructuur in Rotterdamse Haven nog niet meegenomen in doorrekening. Deze gaat er echter wel komen. In dat geval worden deze knelpunten naar verwachting (gedeeltelijk) opgelost.
	Botlek-Geervliet Noord	
	Botlek-Theemsweg	
	Botlek-Geervliet	
	Europoort-Maasvlakte	
	Geervliet-Geervliet Noord	
	Merseyweg-Theemsweg	
	Tinte-Europoort	
	Tinte-Geervliet Noord	
	Theemsweg-Europoort	
	Oterleek-De Weel	Pocketstructuur in kop Noord-Holland nog niet meegenomen in doorrekening. Deze gaat er echter wel komen. In dat geval wordt dit knelpunt naar verwachting opgelost.

¹⁶ In de modellering is de import/export van elektriciteit over de verschillende interconnectiepunten met bijvoorbeeld Duitsland verdeeld naar rato van de interconnectiecapaciteit. Dit is versimpeling van de werkelijkheid, aangezien de import of export zich in werkelijkheid niet evenredig over de interconnectiepunten verdeelt. Zo kan er bijvoorbeeld in Noord-Nederland export plaatsvinden terwijl er tegelijkertijd in Zuid-Nederland import van elektriciteit plaatsvindt. Om de import/export per individueel interconnectiepunt goed te bepalen en daarmee zeker te weten of er een knelpunt ontstaat tussen Zwolle en Hengelo is meer gedetailleerde modellering noodzakelijk. Dit was binnen dit project niet mogelijk.

Wat zijn de robuuste ontwikkelingen bij stations richting 2050?

380/220 kV

Tabel 2.5 geeft een overzicht van de robuuste knelpunten bij de 380/150kV- en 220/110kV-transformatoren. Voor elk van deze stations zijn uitbreidingen nodig.

Tabel 2.5 - Robuuste knelpunten transformatoren

Stationsnaam	Type station
Dodewaard	380 kV
Eindhoven	380 kV
Graetheide	380 kV
Maasvlakte	380 kV
Simonshaven ¹⁷	380 kV
Weiwerd ¹⁸	220 kV

Naast nieuwe trafo's zijn er ook extra velden nodig voor het aansluiten van grote opwek of vraag. De volgende producenten en afnemers worden potentieel aangesloten op 380kV- of 220kV-stations:

- windenergie op zee;
- elektrolyzers;
- batterijen;
- regelbare centrales;
- grootschalige wind op land/zonnevelden;
- power-to-heat/elektrificatie industrie.

In de doorrekeningen van TenneT is niet gekeken hoeveel nieuwe velden noodzakelijk zijn. Daarom is hier een aparte analyse voor gedaan. Om te bepalen hoeveel extra velden nodig zijn, is per locatie gekeken hoeveel vermogen er bij komt voor deze bovenstaande categorieën. Hieronder wordt naar de additionele velden gekeken die nodig zijn bovenop de huidige situatie en de investeringsplannen TenneT uit 2020, aangezien er wordt aangenomen dat die investeringen sowieso gerealiseerd gaan worden. Deze methodologie wordt ook gehanteerd bij de verbindingen en de transformatoren. Op basis van het additionele vermogen dat per locatie aangesloten moet worden, wordt bepaald hoeveel extra velden noodzakelijk zijn. Er wordt aangenomen dat er maximaal 1 GW vraag óf aanbod aangesloten kan worden per veld.

Er wordt aangenomen dat de investeringen uit het IP2020 voldoende zijn om de 14,6 GW windenergie op zee van het scenario Fundament voor Systeemintegratie uit het IP aan te sluiten. Voor elektrolyse en batterijen worden pas investeringsbeslissingen gemaakt als er een specifieke klantvraag binnenkomt. Er wordt aangenomen dat dat op dit moment nog niet gebeurd is en dat er nog geen nieuwe velden voor het aansluiten van elektrolyzers en batterijen opgenomen zijn in het investeringsplan.

Uit de analyse volgt dat er enkele locaties zijn waar in elk geval nieuwe velden noodzakelijk zijn. Dit gaat om de locaties Beverwijk, Maasvlakte, Borssele/Sloegebied, Eemshaven en Middenmeer. Het plaatsen van nieuwe velden (en mogelijk nieuwe stations als bestaande stations vol zijn) zijn robuuste ontwikkelingen. Elk van deze locaties zijn aanlandingspunten voor windenergie op zee.

¹⁷ Uitbreiding van het station Simonshaven is al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022. Dit is een additionele uitbreiding ten opzichte van de uitbreiding die al opgenomen was in het IP2020 (zie Tabel 2.3)

¹⁸ 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

Tabel 2.6 geeft het minimum aantal extra velden dat nodig is op deze locaties, het robuuste minimum.

Tabel 2.6 - Robuust minimum extra velden aansluiten opwek/vraag in 2050

Locatie	Totaal	Windenergie op zee	Elektrolyse	Batterijen	Regelbare centrales
Beverwijk	2	1	0	1	0
Rotterdam	9	2	4	3	0
Borssele/Sloegebied ^{19,20}	1	0	0	1	0
Eemshaven	4	1	0	2	1
Middenmeer	1	0	0	1	0

De tabel toont dat er op sommige locaties extra velden nodig zijn voor het aansluiten van windparken op zee. Op alle vijf de locaties zijn nieuwe velden nodig voor het aansluiten van batterijen.

Er zijn ook velden nodig voor het aansluiten van elektrolyzers. Alleen in Rotterdam komen in alle scenario's een aanzienlijk vermogen aan elektrolyzers (zie ook paragraaf 3.1), dus alleen daar zijn in elk scenario nieuwe velden noodzakelijk. Verder volgt dat alleen bij de Eemshaven in alle gevallen een nieuw veld nodig is voor het aansluiten van regelbare centrales. Op andere locaties is de huidige infrastructuur voldoende om het minimale benodigde vermogen aan centrales aan te sluiten.

In de doorrekeningen is grootschalige opwek op land aangesloten op 110kV- en 150kV-stations. Daarom zijn er in dat geval geen velden nodig bij 380kV- en 220kV-stations. Maar het is bij clustering ook een optie om deze grootschalige opwek op land direct aan te sluiten op een 380kV- of 220kV-station. In dat geval zijn er wel extra velden nodig, één per GW hernieuwbare opwek die aangesloten wordt. Deze optie is niet bekeken.

Indien grote energie-intensieve industriële bedrijven gaan elektrificeren, bijvoorbeeld met power-to-heat, kunnen deze een directe aansluiting op het 380 kV nodig hebben en zijn hiervoor extra velden noodzakelijk. Dit is het geval indien bedrijven een aansluiting van meer dan 500 MW nodig hebben. Aangezien er geen gegevens van individuele bedrijven zijn is het niet mogelijk om in te schatten hoeveel velden hiervoor nodig zijn. Daarom wordt dit niet meegenomen. Het is de verwachting dat een aantal grote industrieën een aansluiting op het 380kV-net zullen aanvragen. Dit betekent dat het aantal nieuwe velden dat noodzakelijk is wordt onderschat. Maar de verwachting is dat het aantal velden dat hierdoor niet in beeld zijn, beperkt is, aangezien de maximale elektriciteitsvraag in de gehanteerde scenario's rond de 1,5-2 GW per industriecluster ligt.

Tot slot zijn er ook nog nieuwe velden nodig om nieuwe verbindingen aan te sluiten. Deze velden worden meegenomen bij het ruimtebeslag voor de oplossingsrichtingen van de robuuste knelpunten.

Stations 150/110 kV

Zoals eerder vermeld wordt er bij dit spanningsniveau niet gekeken naar individuele stations. Er wordt enkel een inschatting gegeven van de totale ruimte die noodzakelijk is voor deze stations. Daarom zijn er ook geen robuuste knelpunten.

¹⁹ In sommige scenario's is uitgegaan van minder aanlanding van windenergie op zee dan de 5,4 GW die nu voorzien wordt, aangezien de scenario's opgesteld zijn voordat deze plannen bekend waren. Daarom ligt het robuust minimum eigenlijk hoger dan in deze tabel aangegeven wordt.

²⁰ De aanleg van een nieuw station in Borssele/Sloegebied is al opgenomen in het nieuwe investeringsplan van TenneT, het IP2022.

Welke oplossingsrichtingen zijn er voor knelpunten?

Het bepalen van oplossingsrichtingen voor knelpunten op het hoogspanningsnet is een ingewikkeld en casusafhankelijk proces. Het is binnen het PEH echter niet mogelijk om elk afzonderlijk knelpunt uitgebreid te analyseren. Om toch een grove inschatting te kunnen maken van de benodigde ruimte voor energie-infrastructuur zijn er in samenspraak met TenneT versimpelde stelregels opgesteld voor de oplossingsrichtingen voor knelpunten. Deze stelregels staan in bijlage A.

Voor alle robuuste knelpunten die bij de verbindingen en stations zijn geïdentificeerd is een ruimtelijke oplossing noodzakelijk. Bij de verbindingen gaat dit om een nieuwe verbinding (bij 380 kV/220 kV) of het instellen van een (kleinere) pocketstructuur (bij 150 kV/110 kV). Bij stations gaat het om het plaatsen van nieuwe transformatoren of het plaatsen van nieuwe velden om grote producenten of afnemers aan te sluiten. In sommige gevallen zijn hier nieuwe stations voor nodig. In Bijlage XIa *Beoordeling Milieu & Ruimte robuuste ontwikkelingen* wordt ingegaan op de ruimtelijke consequenties.

3 Gassen (waterstof en methaan)

De infrastructuur van de gassen die hier beschreven wordt, beperkt zich tot die van waterstof en methaan via publieke leidingen. Het gaat hier om het Hoofd Transport Leidingennet (HTL) van Gasunie, waarin H-gas en L-gas getransporteerd wordt. Het Nationaal Waterstofnetwerk zoals beschreven in HyWay 27 en aansluitleidingen vanaf het HTL naar directe afnemers zijn hier onderdeel van. Waterstoftransport door private buisleidingen is onderdeel van PEH maar wordt toegelicht in de Bijlage V *Buisleidingen brandstoffen, grondstoffen en CO₂*.

3.1 Productie waterstof en methaan

Waterstof kan onder meer geproduceerd worden uit elektriciteit en water, middels elektrolyse, en uit aardgas, bijvoorbeeld middels Steam Methane Reforming (SMR) en Auto Thermal Reforming (ATR) i.c.m. Carbon Capture en Storage (CCS). Waterstofproductie uit elektrolyse wordt in 2050 onderdeel van de energie-infrastructuur. Er is namelijk een connectie met zowel de elektriciteits- als gasinfrastructuur omdat elektrolyse wordt ingezet om elektriciteit op te slaan en zo flexibiliteit te leveren.

SMR wordt in sommige scenario's ingezet om een continue stroom waterstof te produceren voor de industrie, maar dit heeft geen significante impact op de energiehoofdstructuur. Er wordt alleen gekeken naar de productie die onderdeel is van, of impact heeft op de nationale infrastructuur. Dat betekent dat alleen productie van waterstof uit elektrolyse meegenomen wordt. Groengasproductie wordt niet meegenomen aangezien dit lokaal plaatsvindt en het PEH geen productielocaties voor groengas aanwijst.

Elektrolyzers

Elektrolyzers hebben een systeemfunctie doordat ze overschotten van elektriciteit omzetten in waterstof. Vanuit deze functie kunnen elektrolyzers geplaatst worden bij locaties waar veel overschotten van elektriciteit ontstaan in piekuren (bij aanlandingspunten windenergie op zee of opweklocaties van wind of zon op land) of bij locaties waar veel vraag is naar waterstof (in industrieclusters)²¹. In de gebruikte scenario's is er gevarieerd in deze locaties en de mate van spreiding of clustering (dit wordt ook uitgewerkt in structuurkeuze 4 in de Bijlage VIII *Beschrijving structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050*).

²¹ Elektrolyzers kunnen ook ingezet worden om alle geproduceerde elektriciteit uit wind of zon om te zetten in waterstof. Deze vorm van inzetten van elektrolyzers is buiten beschouwing gelaten in de scenario's.

De aannames rondom locaties van elektrolyzers staan uitgebreid beschreven in Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*.

In de Rotterdamse Haven, op de Maasvlakte en Botlek, zijn in alle scenario's elektrolyzers geplaatst in 2050, aangezien daar in elk scenario zowel vraag naar waterstof als overschotten van elektriciteit zijn. Daarnaast staan in alle scenario's elektrolyzers gepland in Borssele/Sloegebied. Dit zijn de enige locaties waar in elk scenario elektrolyzers geplaatst worden. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de omvang elektrolyzers op deze scenario's. Het robuuste minimum komt overeen met het minimum van alle zeven scenario's per locatie.

Tabel 3.1 - Robuuste locaties elektrolyse (alle scenario's)

Gebied	Robuust minimum	Maximum scenario's	Eenheid
Rotterdam Haven	4.000	11.700	MW
Borssele/Sloegebied	50	5.300	MW

Naast de Rotterdamse Haven en Borssele/Sloegebied is er nog een aantal gebieden waar in bijna alle scenario's elektrolyzers voorkomen. Tabel 3.2 geeft een overzicht van deze locaties. In Alkmaar, Terneuzen en Geleen zijn in het Sterke Knopen Nationale Sturing scenario geen elektrolyzers geprojecteerd, omdat hier geen aanlandingslocatie van windenergie op zee komt in de scenario's. In de overige scenario's staan daar wel elektrolyzers doordat er vraag is naar waterstof op die locaties en doordat er hernieuwbare opwek op land is. In Beverwijk, Maasbracht en Eemshaven zijn geen elektrolyzers geplaatst in het Sterke Knopen Europese Sturing scenario en het Zeer Sterke Knopen Kernenergie scenario. Dit is omdat de industrie in dit scenario weinig of geen groene waterstof gebruikt op deze locaties. Maar in de overige scenario's komen hier wel elektrolyzers doordat het aanlandingslocaties zijn van windenergie op zee.

Tabel 3.2 - Bijna-robuste locaties voor elektrolyse

Gebied	Niet in scenario	Reden
Alkmaar	Sterke Knopen Nationale Sturing	Geen aanlandingslocatie WoZ in scenario
Terneuzen		
Geleen (Graetheide)		
Beverwijk	Sterke Knopen Europese sturing Zeer Sterke Knopen Kernenergie	Geen/nauwelijks groene H ₂ -vraag industrie in scenario's
Maasbracht		
Eemshaven		

3.2 Opslag

In alle scenario's in 2050 vindt productie van waterstof uit elektriciteitsoverschotten plaats. De vraag naar waterstof kan op een ander moment zijn. Hierdoor ontstaat een behoefte aan opslag. Waterstof wordt in alle scenario's ingezet als brandstof voor regelbare centrales om elektriciteit op te wekken. In sommige scenario's zijn er daarnaast ook nog regelbare centrales die draaien op methaan. Daarnaast wordt waterstof, in sommige scenario's, ingezet als brandstof voor warmte of voor mobiliteit. De omvang van waterstofopslag verschilt per scenario, omdat de productie van en vraag naar waterstof verschilt. Er is gekeken naar verschillende locaties voor de opslag van waterstof. De opslaglocaties zijn in alle Nederland Energie-land-scenario's gelijk, namelijk bij Zuidwending en Epe, Duitsland (net over de grens bij Twente). In de Sterke Knopen-scenario's worden twee varianten onderzocht voor waterstofopslag (dit wordt uitgewerkt in structuurkeuze 6 in de Bijlage VIII *Beschrijving structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050*). In de Sterke Knopen-scenario's wordt een aanpassing onderzocht van de locatie in de zoutcavernes in Epe, Duitsland (over de grens bij Twente) omdat dit buiten de invloed van Nederland ligt.

Tabel 3.3 geeft weer welke opslagen in (bijna) alle scenario's voorkomen. Er is één locatie voor waterstof-opslag die in alle scenario's terugkomt: de opslag in zoutcavernes nabij Zuidwending. De omvang van de opslag verschilt per scenario. In zes van de scenario's wordt een fors deel van de opslag van waterstof in zoutcavernes in Epe, Duitsland gerealiseerd.

Tabel 3.3 - Robuuste (Zuidwending) en bijna-robuste (Epe, Duitsland) opslaglocaties voor waterstof

	Nederland Energieland				Sterke Knopen		Zeer Sterke Knopen
	Regionale Sturing	Nationale Sturing	Europese Sturing	Internationale Sturing	Nationale Sturing	Europese Sturing	Kernenergie
Locatie	Zuidwending						
Omvang opslag [TWh]	24	25	7	31	2	2	2
Locatie	Epe, Duitsland						
Omvang opslag [TWh]	12	12	3	16	0	2	2

Naast waterstof wordt in elk scenario (in meer of mindere mate) gebruikgemaakt van methaan. Dit betekent dat er ook in alle scenario's opslag van methaan nodig is. De locaties voor methaanopslag zijn gelijk in alle scenario's²². Methaan kan worden opgeslagen in de gasopslagen in Grijskerk, Bergermeer en bij Zuidwending. Deze kunnen daarmee niet voor waterstof gebruikt worden, met uitzondering van Zuidwending omdat het daar om meerdere cavernes gaat. Voor methaanopslag worden huidige opslaglocaties gebruikt in lagere volumes dan in het huidige energiesysteem. Er ontstaan daarom geen knelpunten.

3.3 Infrastructuur

De robuust knelpunten bij de gasnetten zijn bepaald op basis van doorrekeningen van de zeven scenario's door Gasunie. In deze doorrekeningen wordt bepaald of de huidige infrastructuur, verdeeld over waterstof en methaan, voldoende capaciteit heeft om alle waterstof en methaan vanuit opwek-, import- of opslaglocaties richting eindgebruikers te transporteren. Indien dit niet zo is dan is er sprake van een knelpunt dat opgelost moet worden.

Welke componenten worden meegenomen?

Voor de gasinfrastructuur worden alleen de benodigde infrastructuur beschouwd voor het transport van waterstof. Hiervoor nemen de volgende componenten mee:

- het Hoofd Transport Leidingennet (HTL): de huidige hoog calorisch gasleidingen verbinden de industrieclusters en worden in het gehanteerde transportmodel in 2050 ingezet voor waterstof-transport²³;
- aansluitleidingen en aftakkingen van en naar het HTL.

²² Er is wel een gevoeligheidsanalyse op de regionalisatie van opslag gedaan door Gasunie, maar deze worden hier buiten beschouwing gelaten.

²³ De daadwerkelijke verdeling van het huidige transportnet tussen waterstof en methaan ligt nog niet vast en zal zich conform de transportbehoefte van beide gassen ontwikkelen.

Transport van groengas wordt niet meegenomen omdat bij groengasproductie naar verwachting geen bovenregionale knelpunten ontstaan. Groengas wordt geproduceerd uit biomassa reststromen, op locaties waar hiervan een overschot is. De capaciteit van het gasnet van Gasunie is, ook na aftrek van het deel dat gebruikt wordt voor waterstoftransport, groter dan de productie volumes van groengas in 2050. Lokaal kan, met name in de zomer, de productie groter zijn dan de vraag in dezelfde regio. Er ontstaat dan mogelijk congestie in regionale netten, wat opgelost kan worden door in te voeden op hogere druk netten m.b.v. een booster. Dit gebeurt in eerste instantie vanuit het RNB (regionale netbeheerders)-netwerk naar het regionale transport leidingennet (RTL). Het RTL bevindt zich binnen de regio en wordt daarom niet meegenomen voor landelijke ruimtelijke reserveringen. Maar wanneer vanuit het RTL gecompriëerd moet worden naar het Hoofd Transport Leidingennet (HTL) zal ruimte gereserveerd moeten worden voor de compressie-units. Het is onduidelijk of en waar deze compressoren nodig zijn. Voor nu wordt aangenomen dat er voor groengas geen bovenregionale knelpunten ontstaan.²⁴

Welke uitbreidingen zijn gepland tot 2030?

Tot 2030 staat de voorbereiding van het Nationaal Waterstofnetwerk, zoals omschreven in HyWay 27, gepland. De voorbereiding bestaat onder meer uit reinigen en gereed maken van leidingen van het HTL met een lengte van ongeveer 980 km en het vervangen van de afsluiters. Daarnaast moet er naar schatting ongeveer 200 kilometer aan nieuwe leidingen gelegd worden.

Het HTL bestaat uit leidingen, waaronder H-gas- en L-gasleidingen, die deels parallel liggen.²⁵ Het H- en L-gasnetwerk zijn met elkaar verbonden via mengstations. Bij mengstations kan H-gas gemengd worden met stikstof en bij het L-gas gemengd worden. Tussen 2013 en 2020 is het volume aan aardgastransport met 21% afgenomen, met name door een afname in Groninger gasproductie. Een verdere afname van 41% is verwacht tussen 2020 en 2030 door afbouw van levering aan buurlanden. Door deze forse afname in vraag naar aardgastransport, kan mogelijk een deel van de aardgasleidingen voor 2030 vrijgemaakt worden. De recente ontwikkeling van import van lng en transport van aardgas via het leidingennetwerk naar buurlanden is hierin niet meegenomen. Het niet-beschikbaar komen van sommige transportleidingen voor waterstof, omdat deze gebruikt worden voor doorvoer van aardgas, kan op de korte termijn niet worden uitgesloten.

De leidingen die voor hergebruik beschikbaar komen hebben doorgaans een diameter van 36-inch en een theoretische capaciteit van 10-15 GW (Strategy&, 2021). Dit is meer dan de capaciteit van het Klimaat-akkoord-scenario uit IP2022, en biedt mogelijk voldoende capaciteit tot 2040 op basis van de scenario's van HyWay 27.

²⁴ Wanneer elektriciteitscentrales gevoed worden met groengas en met een groter vermogen dan het huidige vermogen of op een andere locatie dan de huidige locaties, ontstaan ook knelpunten, analoog aan knelpunten in het waterstofnetwerk als gevolg van centrales. Dit zijn geen robuuste knelpunten en komen aan bod in de structuurkeuzes.

²⁵ H-gas is hoogcalorisch aardgas, L-gas is laagcalorisch aardgas.

Tabel 3.4 - Een overzicht van benodigde aanpassing in leidingen voor het Nationaal Waterstofnetwerk zoals beschreven in HyWay 27

Hoofdtrajecten waterstoftransportring	Totale trajectlengte [km]	Lengte ombouw [km]	Lengte nieuwbouw [km]	Jaar van verwachte aanpassing
Cluster Noord-Nederland	171	140	31	2024-2025
Cluster Rotterdam/Moerdijk	75	n.v.t.	75	2024-2025
Cluster NZKG	30	15	15	2026
Cluster Zeeland	34	n.v.t.	34	2027
Cluster Chemelot	25	25	n.v.t.	2026
Verbinding Noord-Nederland-NZKG	206	175	31	2026
Verbinding NZKG-Rotterdam/Moerdijk	79	79	n.v.t.	2026
Verbinding Rotterdam/Moerdijk-Zeeland	83	83	n.v.t.	2027
Verbinding Noord-Nederland-Chemelot	216	200	16	2027
Verbinding Zeeland-Chemelot	122	122	n.v.t.	2030
Exportverbindingen Duitsland	134	134	n.v.t.	2027-2030
Exportverbinding België	8	8	n.v.t.	2030
Totaal [km]	1.183	981	202	

Welke knelpunten volgen uit de doorrekening?

Figuur 3.1 geeft de resultaten van de doorrekening weer in mate van capaciteitsoverschrijding per scenario. Een overschrijding ontstaat waar de transportbehoefte groter is dan de capaciteit van de leiding op een bepaald uur (of meerdere uren) binnen een jaar. De ernst van de capaciteitsoverschrijding wordt bepaald aan de hand van de piekbelasting door vraag of aanbod ten opzichte van de transportcapaciteit.

De overschrijdingen zijn opgedeeld in drie categorieën:

1. Geen overschrijding (grijs). De overschrijding is lager dan 1%.
2. Lichte overschrijding (geel). De overschrijding ligt tussen de 1% en 10%.
3. Significante overschrijding (rood). De overschrijding is meer dan 10%.

Een capaciteitsoverschrijding van minder dan 10% leidt niet per definitie tot een knelpunt. Deze vallen binnen de gevoeligheid van het model²⁶. Er wordt gesproken van een knelpunt waar de overschrijding meer dan 10% is.

De knelpunten ontstaan met name op aansluitleidingen en/of aftakkingen naar het Nationaal Waterstofnetwerk. De oorzaken zijn meestal de aanwezigheid van grote energiecentrales, opslaglocaties en elektrolyzers. Wanneer de energievraag van een centrale groter is dan de capaciteit van de buisleiding richting die centrale, zal er een knelpunt ontstaan in de aansluitleiding. Opslag van waterstof in huidige gasopslagen kunnen om dezelfde reden knelpunten geven. Wanneer bestaande energiecentrales die nu van G-gas²⁷ voorzien worden in de situatie in 2050 voorzien worden van waterstof, is er in het model nog geen aansluitleiding aanwezig omdat in het model het waterstofnetwerk het huidige H-gasnetwerk is. Ook de aanname van opslag van waterstof in huidige gasopslagen betekent dat er nog geen passende aansluitleiding beschikbaar is. Daarnaast is er in enkele scenario's waterstofopslag op nieuwe locaties geprojecteerd, waar nu geen opslag en daarmee ook geen aansluitleiding is. De waterstof uit elektrolyse

²⁶ Onder andere omdat er één specifiek (weer)jaar gebruikt wordt en er geen onderscheid wordt gemaakt tussen de vraagprofielen per locatie.

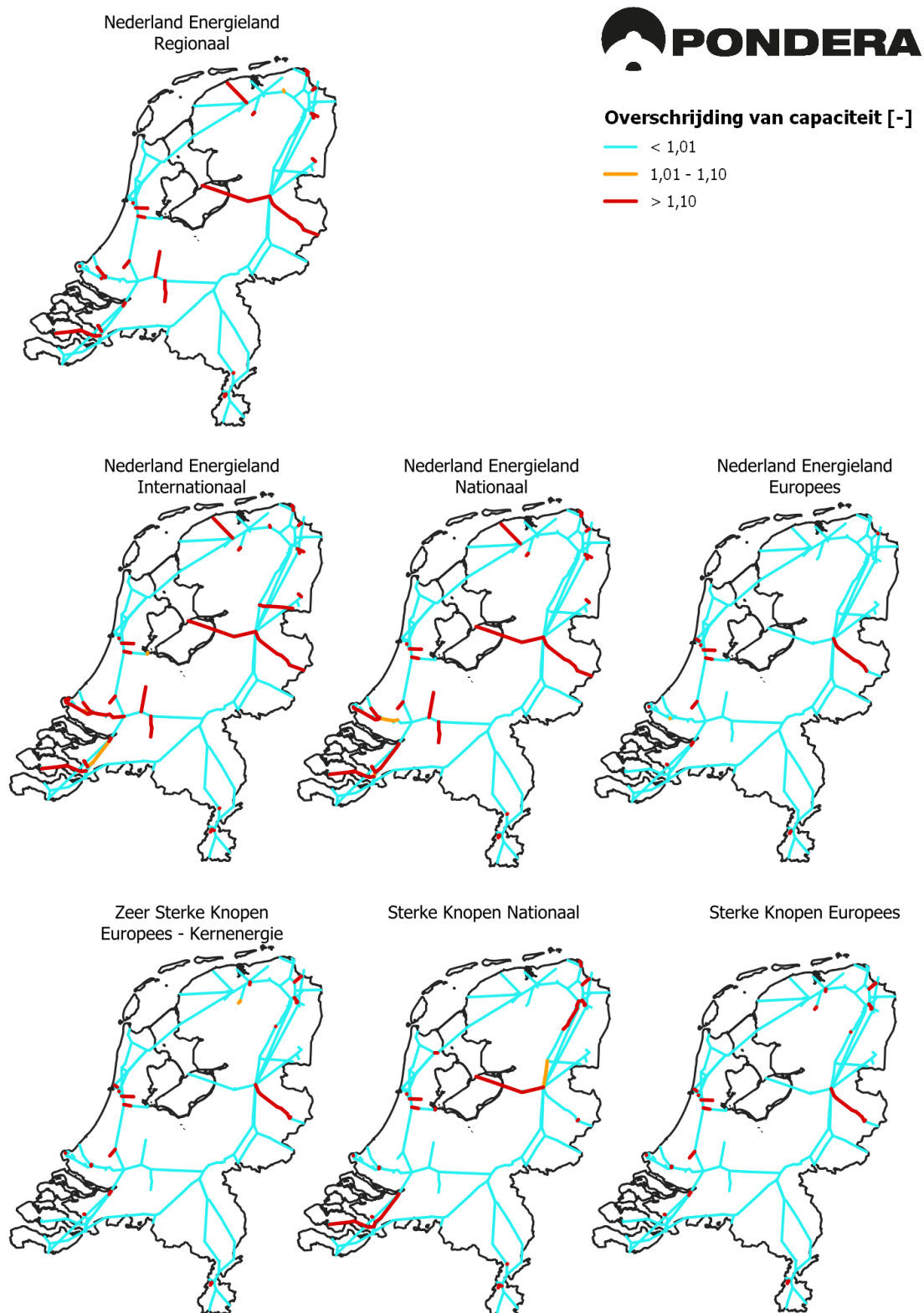
²⁷ G-gas staat voor Groningen-gas. Dit is laagcalorisch gas (L-gas)

wordt geprojecteerd op aftakkingen of aansluitleidingen die onvoldoende capaciteit hebben omdat daar nu geen of veel minder gaslevering is.

De knelpunten in aansluitleidingen en aftakkingen, die nu volgen uit de doorrekening, kunnen in de toekomst nog wijzigen. De exacte locatie, omvang en lengte van de knelpunten wordt in werkelijkheid bepaald door de uiteindelijke locatie gebonden vraag, opslag en productie van waterstof. Een oplossing zal dan per knelpunt bekeken moeten worden. In deze studie gaat het nadrukkelijk om een eerste inschatting vanuit een modelmatige benadering, er is nog veel onzekerheid.

In de Bijlage VI *Knelpuntenanalyse 2050* wordt uitgebreider ingegaan op de doorrekeningen van Gasunie, de aannames in de modellering en de knelpunten die er voor 2050 verwacht worden bij het HTL.

Figuur 3.1 - Resultaten doorrekening waterstofknelpunten in het HTL



Wanneer is een knelpunt robuust?

Een knelpunt is robuust als de leiding in alle scenario's een overschrijding heeft van meer dan 10%. De knelpunten ontstaan dan ondanks een ruime variatie in vraag, opwek en opslag. De robuustheid van de knelpunten gaat dus over de mate van overschrijding, en de locatie. De oplossingsrichtingen zijn afhankelijk van de oorzaak en de aanwezige overige leidingen bij de locatie of binnen het tracé van het knelpunt. Een aantal van de knelpunten treedt op in de Nederland Energieland-scenario's, maar niet in de Sterke Knopen-scenario's. Deze worden bijna-robuste knelpunten genoemd.

Welke robuuste ontwikkelingen zijn er?

Er zijn zeven trajecten die in alle scenario's een capaciteitsoverschrijding van minimaal 10% opleveren en waarbij een robuust knelpunt optreedt. Tabel 3.5 geeft een overzicht van de robuuste knelpunten. Voor elk van deze knelpunten is een oplossing nodig, dit zijn robuuste ontwikkelingen.

Vraag gerelateerde knelpunten

De trajecten bij Chemelot, Moerdijk, Bergen op Zoom, Delfzijl en Noordzeekanaalgebied verbinden de industrie met het Nationaal Waterstofnetwerk. Dit is om de industrie van waterstof te voorzien. Deze trajecten kunnen deels op het industrieterrein zelf liggen. Voor die delen is geen ruimtelijke reservering nodig.

Opslag gerelateerde knelpunten

Het traject in Overijssel (Ommen-Twente) geeft in zes van de zeven scenario's een knelpunt vanwege de import en export van waterstof vanuit de opslag in Epe, Duitsland.

Productie gerelateerde knelpunten

De trajecten IJmond-Beverwijk in Noord-Holland; Delfzijl en Maasvlakte-Wijngaarden zijn aansluitroutes op het Nationaal Waterstofnetwerk vanaf productielocaties.

Tabel 3.5 - Waterstofinfrastructuur robuuste en bijna-robuste knelpunten. De omvang van de knelpunten zijn gegeven als factor t.o.v. de huidige capaciteit

Traject	Nederland Energieland				Sterke Knopen		Zeer Sterke Knopen
	Regionale Sturing	Nationale Sturing	Europese Sturing	Internationale Sturing	Nationale Sturing	Europese Sturing	Kernenergie
Delfzijl	x	x	x	x	x	x	X
Chemelot	X	x	x	x	x	x	x
IJmuiden	x	x	x	x	x	x	X
Westelijk havengebied Amsterdam	x	x	x	x	x	x	x
Schiphol	x	x	x	x	x	x	x
Moerdijk	x	x	x	x	x	x	x
Bergen op Zoom	x	x	x	x	x	x	x
Ommen-Twente	x	x	x	x	0	x	x
Rotterdam-Alexander - Gouda	x	x	x	x	0	x	x
Maasvlakte Rotterdam	x	x	x	x	0	0	0

Welke oplossingsrichtingen zijn er voor de knelpunten?

De leidingen die robuuste knelpunten geven variëren in specificaties, zoals lengte, doorsnede, tracé en oorzaak. Afhankelijk van deze specificaties is een aantal globale oplossingsrichtingen mogelijk:

- In enkele gevallen gaat het om een kort stuk leiding met een kleine diameter, dat onderdeel is van een doorgaande leiding. In dat geval kan, afhankelijk van de specifieke setting, operationeel een oplossing gezocht worden.
- Soms is er in het tracé een andere, bijvoorbeeld G-gasleiding (L-gasleiding) beschikbaar met een grotere diameter. De configuratie kan dan aangepast worden zodat deze leiding gebruikt wordt en het knelpunt verdwijnt.
- Wanneer het gaat om een grote centrale die een kleinere centrale vervangt met een enkele aansluiting, is in de meeste gevallen een verzwaring van de aansluitleiding nodig.

Het bepalen van oplossingsrichtingen voor knelpunten in het gastransportnet is een complex en casusafhankelijk proces. Hieronder wordt per knelpunt aangegeven welke globale oplossingsrichtingen mogelijk zijn:

Traject	Delfzijl
Specificaties	Lengte van 500 m, toevoerleiding. Enkele leiding in tracé.
Oorzaak	Plaatsing van elektrolyzers en invoeding op het H-net.
Oplossingsrichting 1	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.
Oplossingsrichting 2	Een aansluitleiding aanleggen naar de huidige importleiding van methaan. Deze importleiding moet dan wel overschakelen naar waterstof.

Traject	Chemelot
Specificaties	Lengte van 6 km, aansluitleiding.
Oorzaak	Grote elektriciteitscentrale op waterstof.
Oplossingsrichting 1	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.
Oplossingsrichting 2	-

Traject	IJmuiden
Specificaties	Lengte van 150 m, aansluitleiding.
Oorzaak	Plaatsing van elektrolyzers en invoeding op het H-net.
Oplossingsrichting 1	Mogelijk anders schakelen tussen het H-net en het G-net in hetzelfde tracé.
Oplossingsrichting 2	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt of in een nieuw tracé naar een ander koppelpunt.

Traject	Westelijk Havengebied Amsterdam
Specificaties	Lengte van 13 km, aansluitleiding.
Oorzaak	Grote centrale op de locatie van de Hemweg-centrale.
Oplossingsrichting 1	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.
Oplossingsrichting 2	-

Traject	Schiphol
Specificaties	Lengte van 8 km, aansluitleiding.
Oorzaak	Grote centrale op de locatie van de centrale in Diemen.
Oplossingsrichting 1	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.
Oplossingsrichting 2	-

Traject	Moerdijk
Specificaties	Lengte van 3 km, aansluitleiding.
Oorzaak	Grote centrale op de locatie van WKC Moerdijk.
Oplossingsrichting 1	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.
Oplossingsrichting 2	-

Traject	Bergen op Zoom
Specificaties	Lengte van 3 km.
Oorzaak	Vraag naar waterstof van de industrie.
Oplossingsrichting 1	Koppeling maken tussen twee leidingen.
Oplossingsrichting 2	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.

Naast de robuuste knelpunten zijn er ook de bijna robuuste knelpunten. Deze komen in alle Nederland Energieland-scenario's voor, maar niet in alle Sterke Knopen-scenario's.

Traject	Doorgaande leiding Ommen-Twente
Specificaties	Lengte van 50 km
Oorzaak	Opslag van waterstof in Duitsland. Transport vindt plaats via de H-gasleiding, die een lagere capaciteit heeft dan de G-gasleiding.
Oplossingsrichting 1	Passende verdeling tussen waterstof en methaan over het leidingtraject.
Oplossingsrichting 2	Verzwaren van het traject.

Traject	Maasvlakte Rotterdam
Specificaties	Lengte van 0,5 km (aansluiting) tot 25 km (doorvoer tot Rotterdam)
Oorzaak	Plaatsing van elektrolyzers en invoeding op het H-net
Oplossingsrichting 1	Verzwaring.
Oplossingsrichting 2	TenneT en Gasunie hebben de optie van verplaatsen van elektrolyzers naar Krimpen aan de IJssel in combinatie met het elektriciteitsnet verzwaren verkend (dit is duurder).

Traject	Rotterdam Alexander - Gouda
Specificaties	Lengte van 9 km
Oorzaak	Elektriciteitscentrale
Oplossingsrichting 1	Passende aansluitleiding aanleggen in het tracé van het knelpunt.
Oplossingsrichting 2	-

4 Overige buisleidingen

De analyses voor buisleidingen zijn opgenomen in de separate Bijlage V *Buisleidingen brandstoffen, grondstoffen en CO₂*.

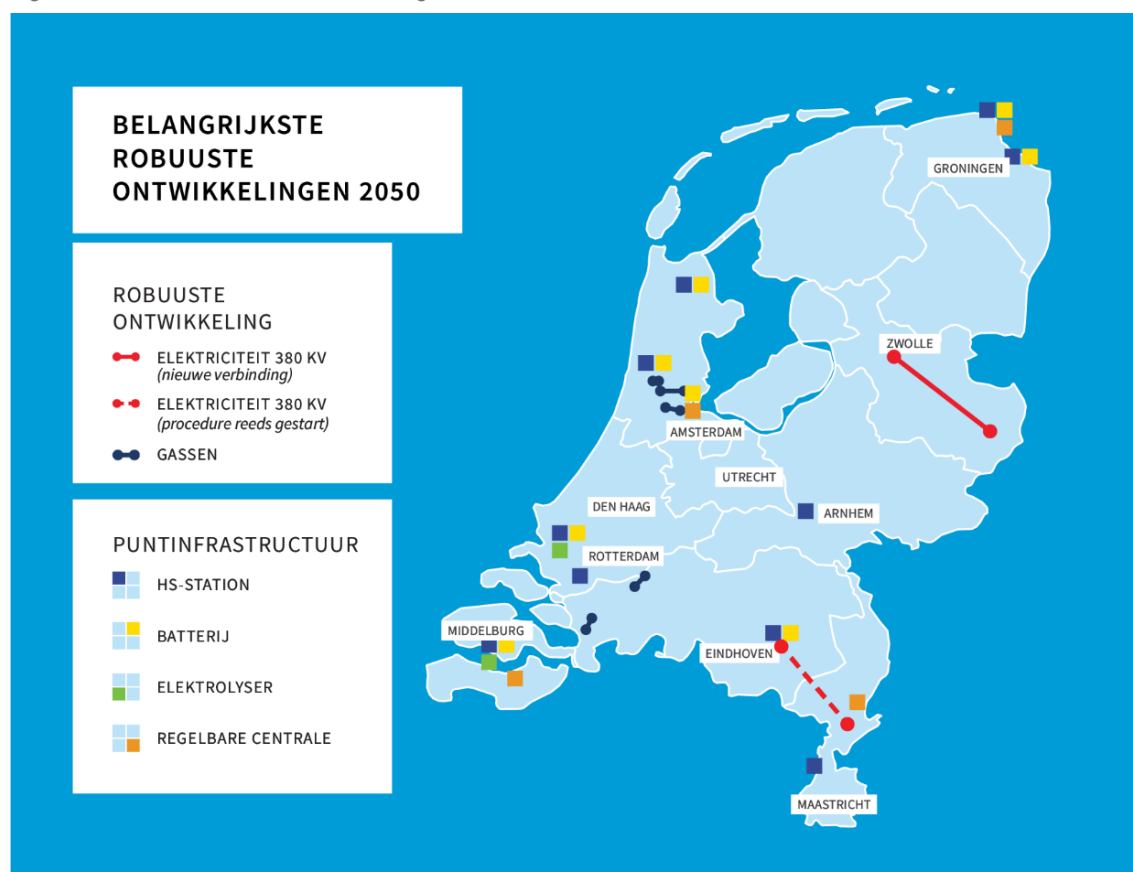
5 Bovenregionaal warmtetransport

Bij bovenregionale warmte-infrastructuur is er geen sprake van robuuste knelpunten. In de toekomst is er wel behoefte aan transport, vaak in de buurt van grootstedelijke gebieden om voldoende warmte op een duurzame manier te voorzien. Maar hiervoor kunnen verschillende warmtebronnen gebruikt worden (rest-warmte of geothermie), welke verbonden zijn met verschillende verbindingen. Daardoor zijn er geen verbindingen die in elk scenario terugkomen en dus robuust zijn. Bovenregionaal warmtetransport komt wel terug bij structuurkeuze 10 in Bijlage VIII *Beschrijving structuurkeuzes en systeemontwikkelingen 2050*.

6 Totaaloverzicht

De robuuste knelpunten zijn gevisualiseerd in Figuur 6.1. Deze figuur bevat naast de robuuste knelpunten bij hoogspanningsverbindingen, gasverbindingen en ook de zoekgebieden voor stations (volgende paragraaf), nieuwe regelbare centrales (paragraaf 2.1) en elektrolyzers (paragraaf 3.1).

Figuur 6.1 - Overzicht robuuste ontwikkelingen



7 Bronnen

- BCI. (2020). *Haalbaarheidsstudie Buisleidingen R'dam – Chemelot – NRW, Bijlage 1 Trace Alternatieven en Afwegingen*. Nijmegen: Buck Consultants International.
- Berenschot, Kalavasta. (2020). *Klimaatneutrale energiescenario's 2050*. Utrecht: Berenschot.
- CE Delft. (2021). *Groeiprojecties energie-intensieve industrie*. Delft: CE Delft.
- CIEP. (2017). *The European Refining sector - a diversity of markets*. Den Haag: Clingendael International Energy Programme.
- EBN, Gasunie. (2017). *Transport en Opslag van CO2 in Nederland*. Den Haag: Energiebeheer Nederland.
- Netbeheer Nederland. (2021). *Het Energiesysteem van de Toekomst*. Den Haag: Netbeheer Nederland.
- Netbeheer Nederland. (2021). *Het Energiesysteem van de Toekomst*.
- Nieuwland GEO-Informatie. (2008). *Ruimtelijke Analyse Buisleidingstroken en -tracés - Deel A: Hoofdrapport*. Wageningen: Nieuwland GEO-Informatie.
- PBL. (2017). *Negatieve emissies*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL. (2020). *Decarbonisation options for Large Volume Organic Chemical production, Shell Pernis*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Rebel. (2021). *Actualisatie toekomstscenario's voor afvalverbranding in Nederland*. Rotterdam: Rebel.
- Royal HaskoningDHV. (2021). *Nationale CO2-opslagbehoefte tot 2035*. Nijmegen: Royal HaskoningDHV.
- Strategy&. (2021). *HyWay 27: waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk? Eindrapport voor het ministerie van Economische Zaken en Klimaat*. Amsterdam.

A. Oplossingsrichtingen elektriciteit

Binnen de IEA voor het PEH moeten oplossingsrichtingen bepaald worden voor knelpunten in de infrastructuur, zowel voor robuuste knelpunten als voor knelpunten die voortkomen uit bepaalde structuurkeuzes.

Het bepalen van oplossingsrichtingen voor knelpunten op het hoogspanningsnet is een complex en casusafhankelijk proces. Het is voor het PEH niet mogelijk om elk afzonderlijk knelpunt uitgebreid te analyseren. Om toch een grove inschatting te kunnen maken van de benodigde ruimte voor energie-infrastructuur zijn er in samenspraak met TenneT versimpelde stelregels opgesteld voor de oplossingsrichtingen voor knelpunten.

In de analyse worden geen non-infra-oplossingen genomen, zoals andere marktordening of andere inzet van flex. Deze kunnen in de toekomst ook mogelijk een deel van de geïdentificeerde knelpunten oplossen, waardoor een deel van de ruimte die wij noodzakelijk achten voor nieuwe hoogspanningsinfrastructuur toch niet gebruikt hoeft te worden.

De ruimtelijke impact van de oplossingsrichtingen worden behandeld in de Bijlagen Xla *Beoordeling Milieu & Ruimte robuuste knelpunten 2050* en Xlb *Beoordeling Milieu & Ruimte structuurkeuzes 2050*.

Scope

Voor hoogspanningsinfrastructuur worden zowel verbindingen als stations beschouwd.

Bij de verbindingen wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende spanningsniveaus van het hoogspanningsnet, dus 380 kV, 220 kV, 150 kV en 110 kV. De oplossingsrichtingen, de kosten en het ruimtebeslag kunnen namelijk verschillen per spanningsniveau.

Hoogspanningsstations kunnen uit verschillende componenten bestaan:

- transformatoren om de elektriciteit om te zetten naar een ander spanningsniveau (bijvoorbeeld ;
- belden om afnemers of producenten aan te sluiten of om verbindingen aan te sluiten;
- overige elektrotechnische componenten, zoals rails.

Er wordt geanalyseerd hoeveel nieuwe transformatoren nodig zijn en hoeveel extra nieuwe velden geplaatst moeten worden voor het aansluiten van nieuwe afnemers, producenten of verbindingen. Hierbij wordt ook weer onderscheid gemaakt naar spanningsniveau. Bij 380kV- en 220kV-stations worden individuele stations geanalyseerd. Bij 150kV- en 110kV- stations wordt alleen geanalyseerd hoeveel ruimte in totaal nodig is voor nieuwe componenten, aangezien het aantal stations hier te groot is voor individuele analyses.

Verbindingen en transformatoren

De netbeheerders hebben in hun doorrekening bepaald op welke plekken in het hoogspanningsnet knelpunten plaatsvinden doordat niet alle energie getransporteerd kan worden van de productielocatie naar de afnemer. Voor elk knelpunt is een oplossing noodzakelijk. Het is echter niet zo dat elke oplossing van knelpunten een (aanzienlijke) ruimtelijke impact heeft.

Grofweg zijn er de volgende oplossingen:

- **Redispatch.** 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.
- **Verzwarend.** Bij verzwarend worden de geleiders van bestaande verbindingen opgewaardeerd naar 4kA-geleiders, waardoor deze meer elektriciteit kunnen transporteren. Deze maatregel heeft geen significante ruimtelijke consequenties, maar wel financiële consequenties. Er wordt aangenomen dat alle 380kV-verbindingen verzwaard worden door inzet van 4kA-geleiders richting 2050. Dit is conform de plannen van TenneT.
- **Nieuwe infrastructuur.** Alleen als een forse hoeveelheid energie op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (en de ENT dus hoog is) zijn infrastructuraanpassingen met aanzienlijke ruimtelijke impact noodzakelijk. De volgende vormen van nieuwe infrastructuur worden onderscheiden:
 - **Nieuwe verbinding.** Als er een ernstig knelpunt optreedt op 380kV-verbindingen kan een nieuwe verbinding worden aangelegd. Dit kan parallel aan de bestaande verbinding, maar ook via een nieuw tracé.
 - **Opwaarderen verbinding.** Indien er een ernstig knelpunt optreedt bij 220kV-verbindingen kan het een optie zijn om deze te vervangen door 380kV-verbindingen.
 - **Nieuwe trafo.** Indien er een ernstig knelpunt optreedt op transformatoren moet een nieuwe trafo geplaatst worden. Nieuwe trafo's kunnen op bestaande stations geplaatst worden indien hier ruimte voor is. Anders moet een nieuw station ontwikkeld worden. Er kunnen maximaal vier trafo's op één station geplaatst worden. Bij 380kV-stations zijn dit 500 MW trafo's, bij 220kV-stations 380 MW.
 - **Implementeren (kleinere) pockets²⁸.** Indien er knelpunten op 150kV- of 110kV-verbindingen optreden kunnen pockets ingesteld worden²⁹. Indien er al pockets zijn kunnen de bestaande pockets 'opgeknijpt' worden in kleinere pockets. Er kan ongeveer 1 GW vraag en 1,5 GW opwek binnen een pocket aangesloten worden.

Categorisatie knelpunten

Elk knelpunt krijgt een classificatie om te bepalen hoe groot het risico op een ruimtelijke ingreep is. Deze classificatie wordt gebaseerd op de hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (ENT)³⁰. De verschillende classificaties worden in de figuren aangegeven met kleuren.

²⁸ 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. Op deze manier is er minder transport via de lagere spanningsniveaus noodzakelijk doordat de stroom snel afgevoerd kan worden naar het 380kV- of 220kV-net.

²⁹ Dit is alleen het geval in de kop van Noord-Holland en rondom Rotterdam. Ten tijde van het opstellen van het netmodel was het nog onduidelijk hoe de pocketstructuur in die regio's eruit moest gaan zien. Doordat de pocketstructuur in die regio's nog niet meegenomen is zie je daar in de verschillende scenario's veel knelpunten op het 150kV-net. Het is de verwachting van TenneT dat hier wel pockets gaan komen.

³⁰ Hierbij wordt aangenomen dat alle 380kV-verbindingen uitgerust zijn met 4kA-geleiders (zie vorige voetnoot). Dit heeft effect op de capaciteit van de verbindingen en op die manier op de hoeveelheid energie die niet getransporteerd kan worden.

De volgende classificaties worden gehanteerd:

- **Geen knelpunt (groen).** Op elk moment van het jaar kan alle elektriciteit getransporteerd worden. Er is dus geen oplossing nodig.
- **Licht knelpunt (geel).** Op enkele momenten in het jaar kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Maar dit kan hoogstwaarschijnlijk opgelost worden zonder ruimtelijke ingreep.
- **Middelgroot knelpunt (oranje).** Op enkele momenten in het jaar kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Maar dit kan waarschijnlijk opgelost worden zonder ruimtelijke ingreep.
- **Zwaar knelpunt (rood).** Regelmatig kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Hiervoor is waarschijnlijk een ruimtelijke ingreep noodzakelijk.
- **Zeer zwaar knelpunt (paars).** Regelmatig kan niet alle elektriciteit getransporteerd worden. Hiervoor is hoogstwaarschijnlijk een ruimtelijke ingreep noodzakelijk.

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de oplossingsrichtingen per type knelpunt dat wordt aangenomen. Er wordt aangenomen dat er bij 'Zware' en 'Zeer zware' knelpunten altijd nieuwe infrastructuur nodig is. Bij 'lichte' en 'middelgrote' knelpunten wordt aangenomen dat dit altijd met redispatch opgelost kan worden. In de praktijk is dit minder zwart-wit en kan er bijvoorbeeld in sommige gevallen bij 'middelgrote' knelpunten wel nieuwe infra nodig zijn en in andere gevallen bij 'zware' knelpunten niet. Zoals eerder gemeld wordt aangenomen dat alle 380kV-verbindingen verzaamd worden met 4kA-geleiders.

Tabel 0.1 - Oplossing knelpunten hoogspanning

Ernst van knelpunt	Oplossingsrichtingen	
	Redispatch	Nieuwe infrastructuur
Geen	-	-
Licht	X	
Middelgroot	X	
Zwaar		X
Zeer Zwaar		X

Grenzen categorieën

Hieronder staat een overzicht van de grenzen die gehanteerd worden voor de categorieën. Bij stations worden drie categorieën (geen, licht, zwaar) gehanteerd.

Tabel 0.2 - Grenzen categorieën

Ernst van knelpunt	Verbindingen		Stations		Eenheid
	380/220 kV	150/110 kV	380/220 kV	150/110 kV	
Geen	0	0	0	Niet individueel bekeken	TWh ENT
Licht	0-0,1	0-0,05	Tussen 0 en 0,1		
Middelgroot	0,1-0,5	0,05-0,1			
Zwaar	0,5-1	0,1-0,5	>0,1		
Zeer Zwaar	>1	>0,5			

Nieuwe velden

Naast nieuwe trafo's zijn er ook extra velden nodig voor het aansluiten van grote opwek of vraag.

De volgende categorieën worden potentieel aangesloten op 380kV- of 220kV-stations:

- windenergie op zee;
- elektrolyzers;
- batterijen;
- regelbare centrales;
- grootschalige wind op land/zonnevelden;
- power-to-heat/elektrificatie industrie.

Om te bepalen hoeveel extra velden nodig zijn, is er per locatie gekeken hoeveel vermogen er bij komt voor deze bovenstaande categorieën. Op basis van het additionele vermogen dat per locatie aangesloten moet worden, wordt bepaald hoeveel extra velden noodzakelijk zijn. Er kan maximaal 1 GW vraag óf aanbod aangesloten worden per veld. Per station kan maximaal 6 GW opwek en 3 GW vraag aangesloten worden.

B. Oplossingsrichtingen waterstof

Voor knelpunten in aansluitleidingen gelden de volgende globale oplossingsrichtingen:

1. In enkele gevallen gaat het om een kort stuk leiding met een kleine diameter, dat onderdeel is van een doorgaande leiding. In dat geval kan, afhankelijk van de specifieke setting, operationeel een oplossing gezocht worden. Dit geldt als de overschrijding niet groot is.
2. (Andere) keuzes maken tussen methaan of waterstof in onderdelen van het H-gas- of L-gasnetwerk. In sommige tracés zijn meerdere leidingen aanwezig, die afzonderlijk ingezet kunnen worden voor waterstof of methaan. Op dit moment is in het model de verdeling als volgt: H-gasleidingen worden ingezet voor waterstof, L-gasleidingen voor methaan. Een herverdeling op basis van capaciteit en transportvraag kan knelpunten verhelpen.
3. Wanneer het gaat om een grote centrale die een kleinere centrale vervangt met een enkele aansluiting, is in de meeste gevallen een verzwaring van de aansluitleiding nodig.