

BIJLAGE VI Knelpuntenanalyse 2050

Op basis van doorrekeningen netbeheerders

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

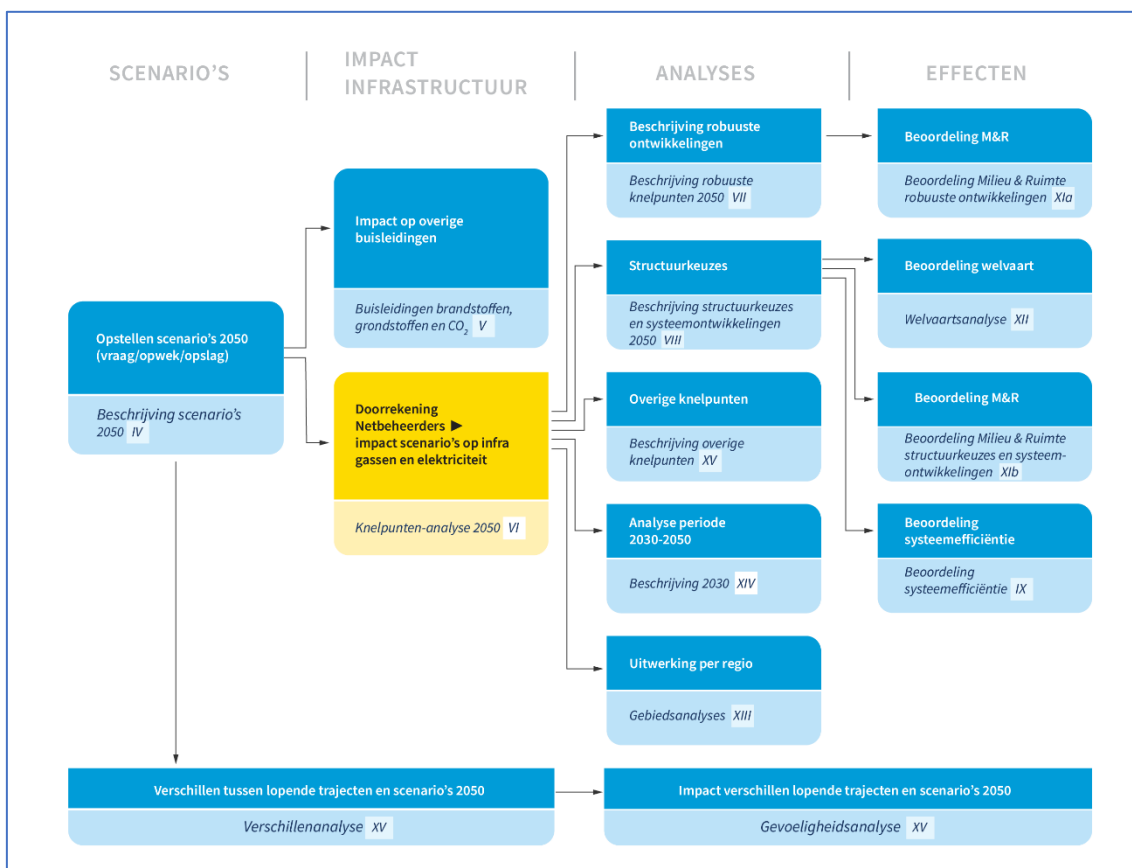
In het onderzoek is gebruikgemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid 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 VI, *Knelpuntenanalyse 2050*, worden de resultaten van de doorrekening van de scenario's door de netbeheerders gepresenteerd. Op basis van deze doorrekeningen wordt een inschatting gemaakt van de benodigde energie-infrastructuur voor elk van de scenario's. Dit is de tweede stap in het onderzoek, na het opstellen van de scenario's en staat daarom redelijk links in Figuur 0-1 met de samenhang van de bijlagen. Op basis van de knelpuntenanalyse worden verdere analyses gedaan van de robuuste knelpunten en ontwikkelingen, structuurkeuzes, overige knelpunten en de periode 2030-2050 (*Bijlagen VII, VIII, XIV en XVI*).

Figuur 0-1 - Overzicht en samenhang bijlagen IEA PEH



Inhoudsopgave

0	Samenvatting	1
1	Inleiding	3
1.1	Introductie	3
2	Methodiek doorrekening	3
2.1	Flexdoorrekening	3
2.2	Hoogspanningsnetten	6
2.3	Gastransportnetten	10
2.4	Regionale netten	11
3	Resultaten flexdoorrekeningen	11
4	Resultaten hoogspanningsnetten	12
4.1	Hoogspanningsverbindingen	12
4.2	Hoogspanningsstations	17
5	Resultaten gastransportnetten	21
5.1	Waterstofnet	21
5.2	Methaannet	23
5.3	Shortlist van knelpunten in het waterstofnet	23
6	Resultaten regionale netten	25
6.1	Elektriciteitsnetten	25
6.2	Gasnetten	27
A.	Oplossingsrichtingen elektriciteit	28
A.1.	Scope	28
A.2.	Verbindingen en transformatoren	29
A.3.	Nieuwe velden	31
B.	Oplossingsrichtingen waterstof	31

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. Vier scenario's, de Nederland Energieland-scenario's, zijn direct overgenomen vanuit de Integrale Infrastructuurverkenning I13050 (Netbeheer Nederland, 2021). Daarnaast zijn voor de Integrale Effectenanalyse (IEA) van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) twee ruimtelijke varianten toegevoegd op de I13050-scenario's, dit worden de Sterke Knopen-scenario's genoemd. Ook is één scenario met kernenergie toegevoegd. Deze wordt het Zeer Sterke Knopen-scenario genoemd. De scenario's worden uitgebreid omschreven in de Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*.

In de zeven scenario's die gehanteerd worden zijn 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*).

Op basis van de zeven scenario's die opgesteld zijn, hebben de netbeheerders berekend hoeveel regelbare centrales, opslag en conversie noodzakelijk is voor een robuust energiesysteem. Dit worden de flexdoorrekeningen genoemd. Daarnaast berekenen de netbeheerders welke eventuele knelpunten optreden in de energie-infrastructuur. Dit wordt de knelpuntenanalyse genoemd. Vanwege de scope van het PEH worden alleen integrale doorrekeningen gedaan van de nationale energie-infrastructuur, dus de hoogspanningsnetten en de nationale gasinfrastructuur (waterstof en groengas). Er wordt wel een globale berekening gedaan van de effecten op de regionale elektriciteitsnetten. Voor warmte-infrastructuur en overige buisleidingen worden losse analyses gedaan. Voor zowel de flexdoorrekeningen en de knelpuntenanalyse is de methodologie die ontwikkeld is voor I13050 gebruikt (Netbeheer Nederland, 2021).

In deze bijlage worden de doorrekeningen door de netbeheerders besproken. In hoofdstuk 2 wordt de methodiek besproken die is gehanteerd voor de doorrekeningen. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de flexdoorrekeningen besproken. Vervolgens wordt de knelpuntenanalyse voor het hoogspanningsnet (hoofdstuk 4), de gastransportnetten (hoofdstuk 5) en de regionale netten (hoofdstuk 6) besproken.

2 Methodiek doorrekening

2.1 Flexdoorrekening

Voor een robuust energiesysteem is het noodzakelijk dat vraag en aanbod van energie op elk moment van het jaar gelijk zijn, voor elke energiedrager. Hiervoor is flexibiliteit in het energiesysteem nodig.

De netbeheerders voeren een jaarrondrekening uit om de behoefte aan flexibiliteit in te schatten. Hier wordt voor elk uur in het jaar en voor elke energiedrager de vraag en het niet-regelbare aanbod van energie bepaald. De onbalans tussen vraag en niet-regelbare aanbod moet vervolgens opgevangen worden met vraagsturing, regelbare productie, opslag of import/export. De soorten flex die meegenomen worden zijn:

- vraagsturing;
- elektriciteitscentrales (regelbare productie);
- elektrolyzers (regelbare productie);
- opslag elektriciteit;

- opslag waterstof en methaan;
- import/export elektriciteit;
- import/export waterstof en methaan.

De inzet van de bovenstaande technieken op elk moment hangt ervan af of er overschotten (niet-regelbare productie groter dan vraag) of tekorten (niet-regelbare productie kleiner dan vraag) zijn. Daarnaast werken de verschillende flexibiliteitsmechanismen op verschillende tijdschalen. Hieronder wordt voor elk van de flexibiliteitsmechanismen omschreven hoe deze meegenomen worden.

2.1.1 Vraagsturing

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

Vraagsturing is gemodelleerd in het Energietransitiemodel¹. Deze vorm van flex wordt als eerste ingezet in de modellering en de vraagprofielen (vraag per uur) worden hierdoor aangepast.

2.1.2 Opslag elektriciteit

Om vraag en aanbod te balanceren is opslag van elektriciteit met batterijen noodzakelijk. Deze batterijen worden ingezet om kortetermijnonbalans tussen vraag en aanbod van elektriciteit op te vangen. De tijdschaal van de inzet van de batterijen is enkele uren². Batterijen zijn niet geschikt voor het opvangen van langetermijnonbalans tussen vraag en aanbod. Hier worden elektrolyzers (bij aanbodoverschot) en regelbare centrales (bij aanbodtekort) voor ingezet.

2.1.3 Elektriciteitscentrales

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

De regelbare centrales draaien in de scenario's op waterstof of groengas. Er zijn verschillende soorten regelbare centrales nodig. Er zijn grootschalige CCGT4F-centrales³ nodig die relatief veel draaiuren maken en een hogere efficiëntie hebben. Daarnaast zijn piekeenheden nodig (OCGT of GT6F⁴) die bijspringen op momenten van forse tekorten en daarmee minder draaiuren maken. Dit type regelbare centrale heeft een lagere efficiëntie.

¹ Het [Energietransitiemodel van Quintel](#) kan gebruikt worden om mogelijke toekomstige energiescenario's te modelleren.

² Hiermee wordt bedoeld dat een batterij enkele uren achter elkaar kan opladen of ontladen en daarmee alleen overschotten of tekorten binnen een dag kan opvangen.

³ Combined Cycle Gas Turbine.

⁴ Open Cycle Gas Turbine of Gasturbine.

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

2.1.4 Elektrolyzers

Elektrolyzers hebben in de modellering een systeemfunctie doordat ze overschotten van elektriciteit omzetten in waterstof. De elektrolyzers zetten alle overschotten van elektriciteit (na inzet van batterijen en curtailment⁵) om in waterstof.

Inzet elektrolyzers

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

2.1.5 Opslag waterstof en methaan

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

Optimaal gebruik opslagcapaciteit voor balancering

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

2.1.6 Import/export elektriciteit

De import en export van elektriciteit wordt gestuurd door prijsverschillen voor elektriciteit tussen landen. Deze prijsverschillen hangen af van de vraag en het hernieuwbare aanbod van elektriciteit in elk land. Een marktmodellering is toegepast om de import en export van elektriciteit te bepalen.

⁵ Ten tijde van grote overschotten van elektriciteit wordt een deel van de elektriciteit 'weggegooid'. Het is namelijk niet rendabel om al deze elektriciteit op te slaan of om te zetten in waterstof. Dit wordt curtailment genoemd. De hoeveelheid elektriciteit die weggegooid wordt met curtailment is beperkt. Het gaat om ongeveer 5% van de totale elektriciteitsproductie (Netbeheer Nederland, 2021).

2.1.7 Import/export waterstof en methaan

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

2.2 Hoogspanningsnetten

TenneT maakt voor elk van de zeven scenario's een doorrekening van de effecten op het hoogspanningsnet. De energetische en ruimtelijke invulling van de scenario's, zoals beschreven in Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*, is de input voor deze doorrekening. Hieronder wordt de methodiek van de knelpuntenanalyse beschreven.

Voor hoogspanningsinfrastructuur worden zowel verbindingen als stations beschouwd.

Bij de verbindingen wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende spanningsniveaus van het hoogspanningsnet, dus 380, 220, 150 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 (bijv. 380 naar 150 kV);
- velden om afnemers of producenten aan te sluiten of om verbindingen aan te sluiten;
- overige elektrotechnische componenten, zoals rails.

2.2.1 Netmodel

Voor deze doorrekening gebruikt TenneT een netmodel met de voorziene netwerktopologie in 2030. Deze netwerktopologie bevat het huidige hoogspanningsnet plus de investeringen uit het investeringsplan uit 2020, het IP2020⁶. Dit betekent dat er doorrekeningen gedaan worden met het hoogspanningsnet dat er naar verwachting ligt in 2030. De knelpunten die tot 2030 optreden, komen dus ook niet naar voren in de doorrekening.

Tabel 2-1 geeft een overzicht van de geplande uitbreidingen van het hoogspanningsnet tot 2030 die meegenomen zijn in het netmodel (maar nu nog niet gerealiseerd zijn). In het overzicht zijn alle uitbreidingen voor 380 en 220 kV en de belangrijkste uitbreidingen voor 150 en 110 kV meegenomen.

Tabel 2-1 - 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	Verzwarende kop van Noord-Holland	Nieuw station

⁶ Ondertussen zijn nieuwe investeringsplannen van de netbeheerders uitgebracht, het IP2022 (TenneT, 2022). Nieuwe projecten uit deze investeringsplannen zijn geen onderdeel van het netmodel. Het wordt aangegeven als deze investeringen terugkomen in de analyses naar de benodigde energie-infrastructuur richting 2050 in de IEA.

Type asset	Naam	Type investering
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	Verzwarende 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/Slogebied – Rilland	Verzwarende
380kV-verbinding	Hengelo – Zwolle	Verzwarende
380kV-verbinding	Ens – Zwolle	Verzwarende
380kV-verbinding	Eindhoven - Tilburg – Geertruidenberg	Verzwarende
380kV-verbinding	Eindhoven – Maasbracht	Verzwarende
380kV-verbinding	Geertruidenberg – Krimpen	Verzwarende
380kV-verbinding	Krimpen-Breukelen-Diemen-Oostzaan-Beverwijk	Verzwarende
380kV-verbinding	Lelystad – Ens	Verzwarende
380kV-verbinding	Diemen – Lelystad	Verzwarende
380kV-verbinding	Doetinchem - Hengelo	Verzwarende
380kV-verbinding	Dodewaard – Doetinchem	Verzwarende
380kV-verbinding	Maasbracht – Boxmeer – Dodewaard	Verzwarende
150/110kV-verbinding		Implementatie pocketstructuur

Tabel 2-1 maakt onderscheid 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.
- **Nieuwe verbinding.** Er wordt een nieuwe hoogspanningsverbinding aangelegd op een tracé waar nu nog geen hoogspanningsverbinding loopt. Bij 380 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.
- **Verzwarend.** De geleiders van bestaande verbindingen worden opgewaardeerd naar 4kA-geleiders⁷, waardoor deze meer elektriciteit kunnen transporteren. Deze maatregel heeft geen significante ruimtelijke consequenties, maar wel financiële consequenties.
- **Implementatie pocketstructuur.** 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. Dit wordt een pocketstructuur genoemd. 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 netmodel is de pocketstructuur voor het gehele 150kV- en 110kV-net meegenomen, behalve in de Kop van Noord-Holland en de regio Rotterdam⁸.

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 'opgeknipt' worden. Dit heeft geen significante ruimtelijke impact.

2.2.2 Doorrekening TenneT

TenneT heeft in zijn doorrekening bepaald op welke plekken in het hoogspanningsnet knelpunten plaatsvinden doordat niet alle energie getransporteerd kan worden van de productielocatie naar de afnemer. Hier wordt de inzet van verschillende flexibiliteitsmechanismen al in meegenomen.

In het netmodel is voor alle componenten van het hoogspanningsnet een maximale belastbaarheid gespecificeerd. Hier wordt onderscheid gemaakt tussen de maximale belastbaarheid in de zomer en de maximale belastbaarheid in de winter. Uit de doorrekening volgt hoeveel elektrisch transport nodig is over elke component. Er is sprake van een capaciteitsknelpunt indien de maximale belasting groter is dan de maximale belastbaarheid. De ernst van capaciteitsknelpunten wordt bepaald door middel van een jaarrondrekening. Voor elk uur van het jaar wordt de belasting op alle componenten bepaald door de gelijktijdige combinatie van vraag, aanbod en flexibiliteit. De ernst van het knelpunt wordt bepaald op basis van de totale hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (Energy Not Transported, ENT).

⁷ Kilo-Ampère.

⁸ Het is nog onduidelijk hoe de pocketstructuur in die regio's eruit moet gaan zien.

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 redispatch⁹ of door verzwaring¹⁰.

Alleen als een grote hoeveelheid energie op jaarbasis niet getransporteerd kan worden zijn infrastructuur-aanpassingen met aanzienlijke ruimtelijke impact noodzakelijk, zoals het aanleggen van een nieuwe hoogspanningsverbinding, het plaatsen van een nieuwe transformator of het implementeren van een nieuwe of kleinere loadpockets. Een uitgebreide omschrijving van de oplossingsrichtingen is te vinden in bijlage A van deze bijlage.

Elk knelpunt krijgt een classificatie om te bepalen hoe groot de kans op een ruimtelijke ingreep is. Deze classificatie is gebaseerd op de hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (ENT)¹¹. De verschillende classificaties worden 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 gehanteerd voor elk spanningsniveau en zowel voor verbindingen als voor transformatoren (bij stations). De grenzen zijn vastgesteld in samenwerking met TenneT en zijn te vinden in bijlage B van deze bijlage. Deze kunnen verschillen per spanningsniveau en type infrastructuur.

2.2.3 Additionele analyse nieuwe velden

In de doorrekening kijkt TenneT naar de hoogspanningsverbindingen en transformatoren op de hoogspanningsstations. Er worden geen berekeningen gedaan voor de nieuwe velden die nodig zijn op hoogspanningsstations voor het aansluiten van grote afnemers of producenten. Hier wordt een afzonderlijke analyse voor gedaan. Hierbij wordt alleen gekeken naar de nieuwe velden die nodig zijn op 220kV- en 380kV-stations.

⁹ 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.

¹⁰ 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 verzwafd worden richting 2050. Dit is conform de plannen van TenneT.

¹¹ 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 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 erbij komt voor deze bovenstaande categorieën. Op basis van het additionele vermogen dat per locatie aangesloten moet worden, is bepaald hoeveel extra velden noodzakelijk zijn.

De investeringen in het IP2020 zijn voldoende zijn om de hoeveelheid windenergie op zee uit het meest ambitieuze scenario voor 2030 van het investeringsplan aan te sluiten. Het gaat daarin om 14,6 GW. Hiervoor zijn geen nieuwe velden meer nodig bovenop de uitgangssituatie voor 2030.

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. Hiervoor zijn dus nog wel extra velden meer nodig bovenop de uitgangssituatie voor 2030.

2.3 Gastransportnetten

Gasunie maakt voor elk van de zeven scenario's een doorrekening van de effecten op het hoofdtransportnet voor methaan en voor waterstof. De energetische en ruimtelijke invulling van de scenario's, zoals beschreven in Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*, is de input voor deze doorrekening. Hieronder wordt de methodiek van de knelpuntenanalyse voor gassen beschreven.

2.3.1 Gasnetmodel

Voor de berekeningen van de knelpunten gebruikt Gasunie een model waarin vraag en aanbod op dichtstbijzijnde aansluitingen op het net worden geprojecteerd.

Het net waarop de knelpunten zijn berekend is het voorziene gasnet in 2030: het huidige gasnetwerk in 2020, inclusief goedgekeurde investeringen volgens het Investeringsplan 2020 en de ontwikkeling van het Nationaal Waterstofnetwerk. Het gaat om het hogedruktransportnet, met een onderverdeling in een H-gas net voor hoogcalorisch gas, en een L-gas net voor laagcalorisch gas. Het H-gasnet, waar veel industrie aan is verbonden, wordt in het model ingezet voor transport van waterstof, terwijl het L-gasnet wordt ingezet voor methaan.

2.3.2 Doorrekening Gasunie

De doorrekening van Gasunie waarop de knelpunten in PEH zijn gebaseerd, projecteert een in het scenario geplaatste vraag naar waterstof of methaan op het dichtstbijzijnde leidingstuk van het gasnetwerk (H-gasnetwerk en L-gasnetwerk respectievelijk). Hetzelfde geldt voor aanbod en opslag.

Bij de projectie van de capaciteiten wordt geen rekening gehouden met de capaciteit van nabijgelegen leidingen. Daardoor kunnen er situaties ontstaan waarbij een grote vraag naar waterstof geprojecteerd

wordt op een nabije leiding met een te kleine diameter, terwijl mogelijk iets verderop een leiding met voldoende capaciteit ligt.

Het waterstoftransport door het H-gasnetwerk en methaantransport door het L-gasnetwerk worden afzonderlijk gemodelleerd. Een aantal elektriciteitscentrales is in 2020 aangesloten op het L-gasnetwerk, en volgens het model in 2050 op waterstof. Hierdoor ontstaat een aantal schijnknelpunten in het H-gasnetwerk: er is een grote leiding aanwezig, maar die 'ziet' het model niet als beschikbaar voor waterstof (alleen voor methaantransport). In werkelijkheid kan in dergelijk geval de configuratie aangepast worden zodat een deel van het L-gasnetwerk voor waterstof wordt gebruikt. Daarmee worden de knelpunten op de gastransportnetten vermoedelijk overschat.

Bij de doorrekening van de gastransportnetten wordt de maximale overbelasting van de capaciteit in het jaar berekend, als percentage van de beschikbare capaciteit. Het model geeft een overzicht van knelpunten per scenario met de mate van overschrijding:

- geen overschrijding;
- minder dan 10% overschrijding;
- meer dan 10% overschrijding.

De mate van overschrijding verschilt per knelpunt. De modellering is verkennend van aard. Overschrijdingen van minder dan 10% vallen mogelijk onder de gevoeligheid van de modellering. Daarom is gekozen om alleen overschrijdingen van meer dan 10% mee te nemen in de knelpuntenanalyse.

2.4 Regionale netten

Voor de doorrekening van de regionale elektriciteitsnetten is een gelijksoortige doorrekening gedaan als voor de hoogspanningsnetten. Ook hier is in de netmodellen van de regionale netbeheerders voor alle componenten een maximale belastbaarheid gespecificeerd en vervolgens een inschatting gemaakt van het elektrische transport dat nodig is over elk component.

De doorrekeningen van de regionale elektriciteitsnetten zijn wel een stuk minder uitgebreid dan de doorrekeningen van de hoogspanningsnetten. De regionale netbeheerders hebben alleen de koppelpunten tussen het regionale net en het hoogspanningsnet doorgerekend. Dit zijn de 150kV- en 110kV-stations. Er worden geen resultaten gegeven voor individuele stations vanwege het grote aantal van dit type stations (honderden). In plaats daarvan maken de regionale netbeheerders een inschatting van de totale hoeveelheid ruimte die nodig is voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations. Per voorzieningsgebied van 380kV- en 220kV-stations wordt aangegeven hoeveel ruimte nodig is voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations.

Er zijn geen doorrekeningen gedaan van regionale gasnetten.

3 Resultaten flexdoorrekeningen

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de vermogens en capaciteiten van de verschillende elementen uit de flexdoorrekeningen. Deze volgen uit de flexdoorrekening van de netbeheerders, die omschreven is in paragraaf 2.1.

Tabel 3-1 - Resultaten flexdoorrekeningen

	Nederland EnergieLand Regionale Sturing	Nederland EnergieLand Nationale Sturing	Nederland EnergieLand Europese Sturing	Nederland EnergieLand Internationale Sturing	Sterke Knopen Nationale Sturing	Sterke Knopen Europese Sturing	Zeer Sterke Knopen Kernenergie	Eenheid
Grootschalige regelbare centrales	15	17	17	16	17	18	12	GW
Grootschalige regelbare centrales	33	36	71	70	37	73	42	TWh
Regelbare centrales	18	18	19	18	19	19	16	GW
Regelbare centrales	7	7	15	15	8	14	11	TWh
Elektrolyzers	42	51	19	16	52	19	18	GWe
Elektrolyzers	48	69	9	6	72	9	13	TWh H ₂
Opslag elektriciteit	54	53	33	29	55	33	27	GW
Opslag waterstof	36	37	10	47	37	10	13	TWh
Opslag methaan	24	14	55	15	14	55	63	TWh
Capaciteit import/export elektriciteit	15	15	15	15	15	15	15	GW
Import elektriciteit	12	10	20	22	10	20	16	TWh
Export elektriciteit	19	22	7	6	22	7	12	TWh
Capaciteit import/export waterstof	5	8	7	33	9	7	7	GW
Import waterstof	47	75	62	291	76	62	57	TWh
Export waterstof	0	0	0	0	0	0	0	TWh
Capaciteit import/export methaan	2	0,1	21	0,2	0,1	21	14	GW
Import methaan	16	1	185	5	1	184	126	TWh
Export methaan	0	0	0	0	0	0	0	TWh

De ruimtelijke invulling van de bovenstaande elementen wordt beschreven in de Bijlage IV *Beschrijving scenario's 2050*.

4 Resultaten hoogspanningsnetten

4.1 Hoogspanningsverbindingen

TenneT heeft de verbindingen van het hoogspanningsnet berekend in de netdoorrekening. Hieronder worden de resultaten besproken. Er wordt onderscheid gemaakt tussen het Extra Hoogspanningsnet (380 en 220 kV) en het Hoogspanningsnet (150 en 110 kV).

4.1.1 380/220kV-verbindingen

Figuur 4-1 geeft een overzicht van de resultaten van de doorrekening van het 220kV- en 380kV-net, voor elk van de scenario's. De kleuren geven de ernst van het knelpunt aan (toegelicht in paragraaf 2.2.1).

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). De knelpunten zijn hier het ergst in het scenario Nederland Energieland Nationale Sturing aangezien daar het grootste vermogen windstroom aanlandt. Bij de Sterke Knopen-scenario's ontstaan minder knelpunten door diepe aanlanding van windstroom (Sterke Knopen Nationale Sturing) en een andere, efficiëntere verdeling van de aanlanding van windstroom over de aanlandingspunten (Sterke Knopen Europese Sturing).

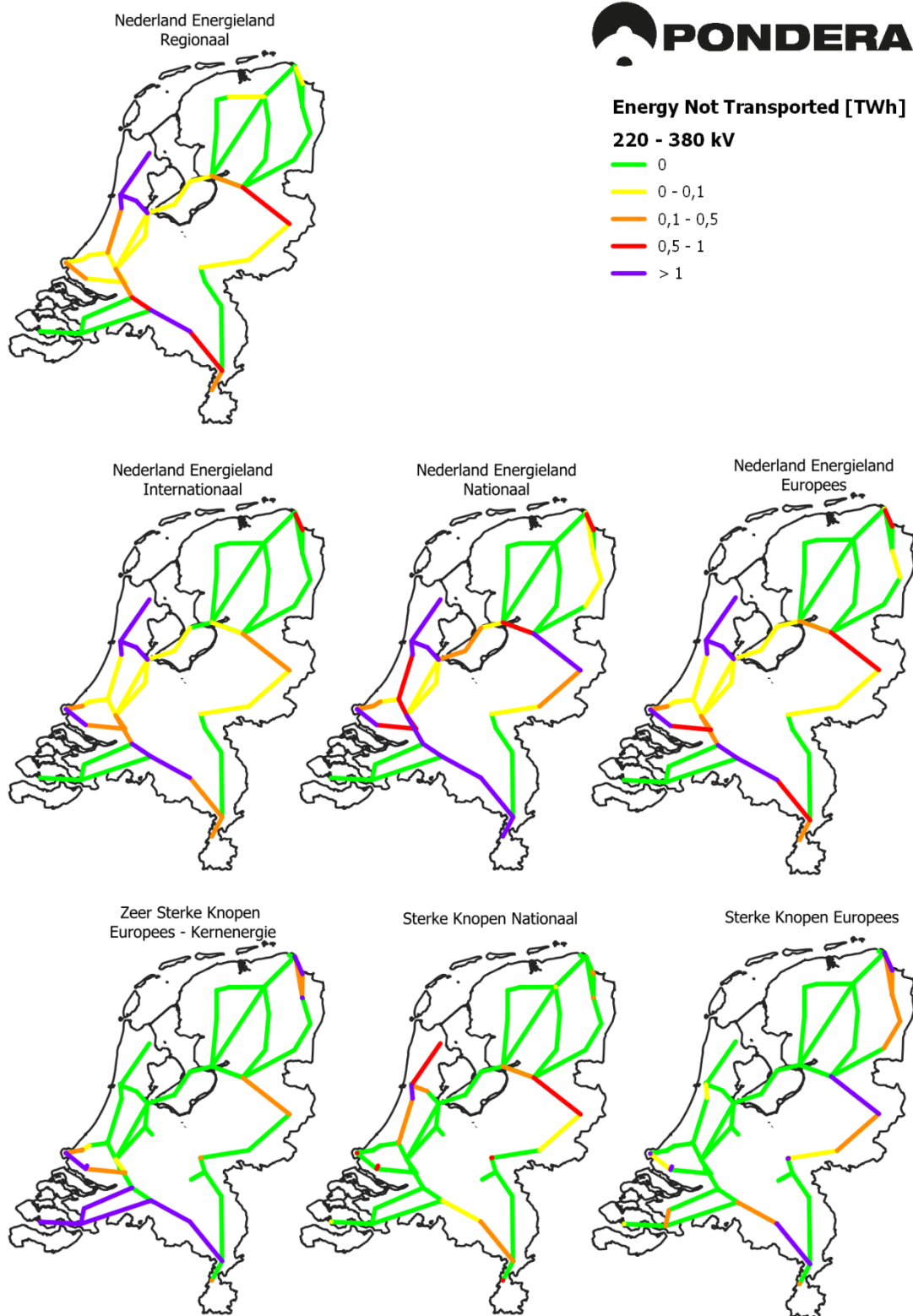
Bij de aanlandingslocaties in Groningen (Eemshaven) en Zeeland (Borssele/Sloegebied/Terneuzen) ontstaan relatief weinig knelpunten door de aanlanding van windenergie op zee. Dat komt enerzijds doordat het hoogspanningsnet hier meer afvoercapaciteit heeft dan bijv. in Noord-Holland. Daarnaast landt hier minder windstroom aan.

Naast de knelpunten in Noord-Holland en tussen Maasvlakte is in alle scenario's een knelpunt tussen Zwolle en Hengelo. Dit knelpunt wordt veroorzaakt door import/export van elektriciteit met Duitsland. Dit knelpunt wordt mogelijk veroorzaakt door beperkte modellering van het buitenland in de doorrekening van TenneT¹². Daarnaast zijn er in sommige scenario's ernstige knelpunten tussen Zwolle en Ens (Flevoland). Deze worden veroorzaakt door een samenloop van verschillende oorzaken. Ook zijn er in elk scenario knelpunten op het hoogspanningsnet in Noord-Brabant.

In het Kernenergie-scenario ontstaan zeer zware knelpunten van Zeeland naar Noord-Brabant. Dit komt doordat er in dit scenario forse hoeveelheden stroom afgevoerd moeten worden vanuit Zeeland door de combinatie van aanlanding van windenergie op zee en een fors vermogen aan kerncentrales die vollast elektriciteit produceren.

¹² In de modellering is de import/export van elektriciteit over de verschillende interconnectiepunten met bijv. 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.

Figuur 4-1 - Resultaten knelpuntendoorrekening 380/220 kV



4.1.2 150/110kV-verbindingen

Figuur 4-2 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 ook paragraaf 2.2.1).

De pocketstructuur is in het huidige gehanteerde netmodel nog niet doorgevoerd in de Kop van Noord-Holland en rondom Rotterdam, aangezien het op het moment van het opstellen van het netmodel nog onduidelijk was hoe deze pockets eruit gaan zien. Het is de verwachting van TenneT dat hier wel pockets gaan komen. 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 dat deze knelpunten opgelost worden door implementatie van de pocketstructuur.

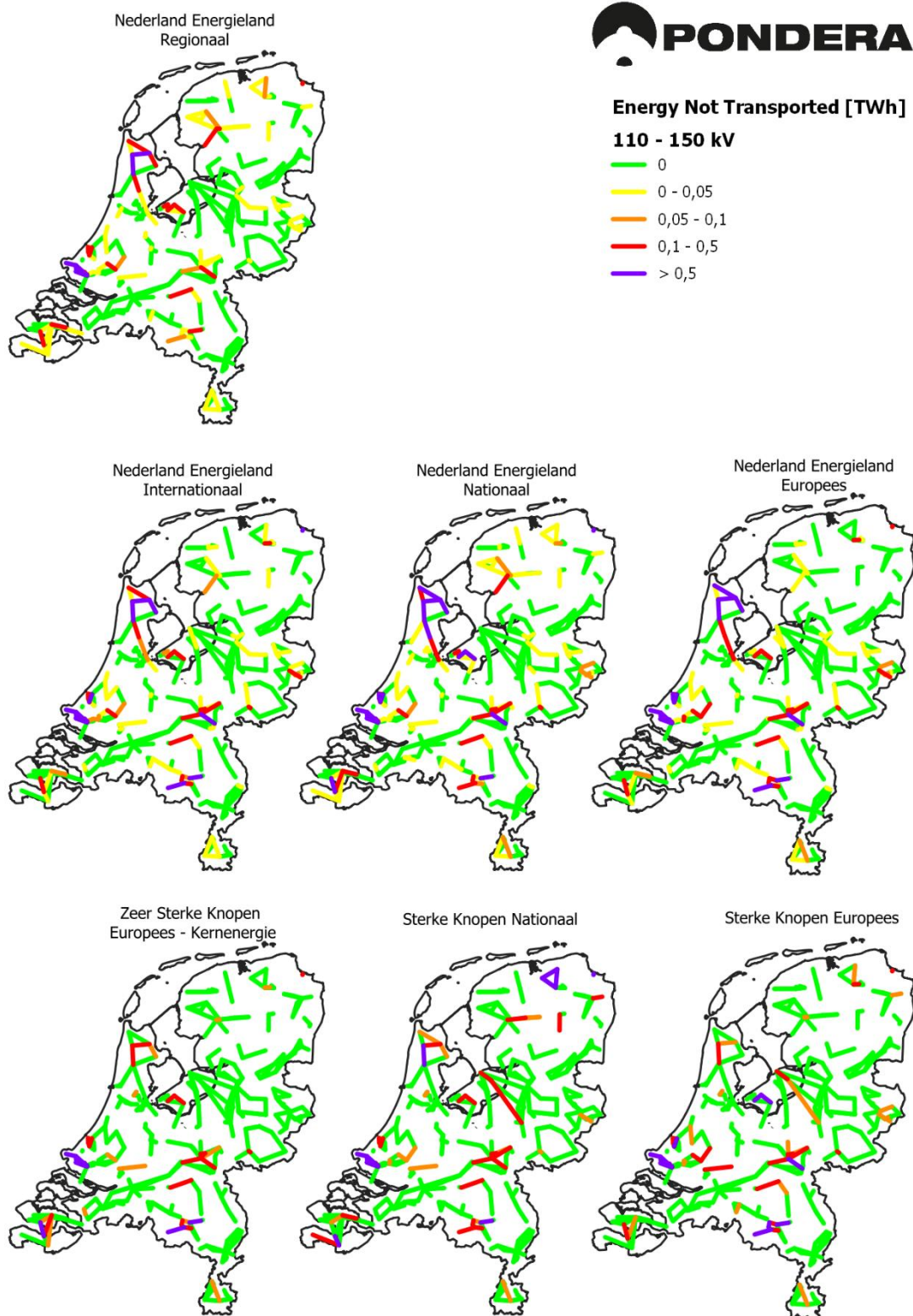
Daarnaast zijn er in enkele scenario's knelpunten rondom Eindhoven. Dit wordt veroorzaakt door een forse toename van de elektriciteitsvraag in deze regio. Daarnaast zijn er in enkele scenario's zware knelpunten in delen van Flevoland, Groningen en Zeeland. Deze worden veroorzaakt door een forse toename van de hernieuwbare elektriciteitsproductie, met name van wind op land.

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 vlakken de productiepieken van met name zonnepanelen (en in mindere mate windturbines op land) flink af. Dit is een belangrijke reden dat er amper knelpunten op 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 wordt.

Figuur 4-2 - Resultaten knelpuntendoorrekening 150/110 kV



4.2 Hoogspanningsstations

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

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

Hieronder worden de knelpunten voor beide functies van stations besproken. De transformatoren zijn doorgerekend door TenneT en worden besproken in paragraaf 4.2.1. Voor de velden voor het aansluiten van grote vragers, grote producenten of verbindingen is een losse analyse. Dit wordt besproken in paragraaf 4.2.2.

4.2.1 Transformatoren

TenneT heeft de belasting en de knelpunten bij de 380kV- en 220kV-transformatoren berekend in de netdoorrekening. Figuur 4-3 geeft een overzicht van de resultaten hiervan.

De knelpunten bij de 380kV- en 220kV-transformatoren kunnen verschillende oorzaken hebben. Het kan onder meer komen door een forse toename van de elektriciteitsvraag in de onderliggende pocket waardoor meer elektriciteit van het 380kV- of 220kV-net naar de 150kV- of 110kV-pocket getransformeerd moet worden dan dat mogelijk is met de bestaande capaciteit van de transformatoren. Het kan ook komen door een forse toename van de opwekcapaciteit binnen de onderliggende pockets waardoor meer stroom vanaf de onderliggende pocket naar het 380kV- of 220kV-net getransformeerd moet worden dan mogelijk is met de bestaande capaciteit.

In elk scenario vinden knelpunten plaats bij de 380kV-stations Dodewaard, Eindhoven, Graetheide, Maasvlakte¹³ en Simonshaven en bij het 220kV-station Weiwerd. In de meeste gevallen komt deze overbelasting vermoedelijk vooral door een forse toename van de elektriciteitsvraag binnen deze pockets.

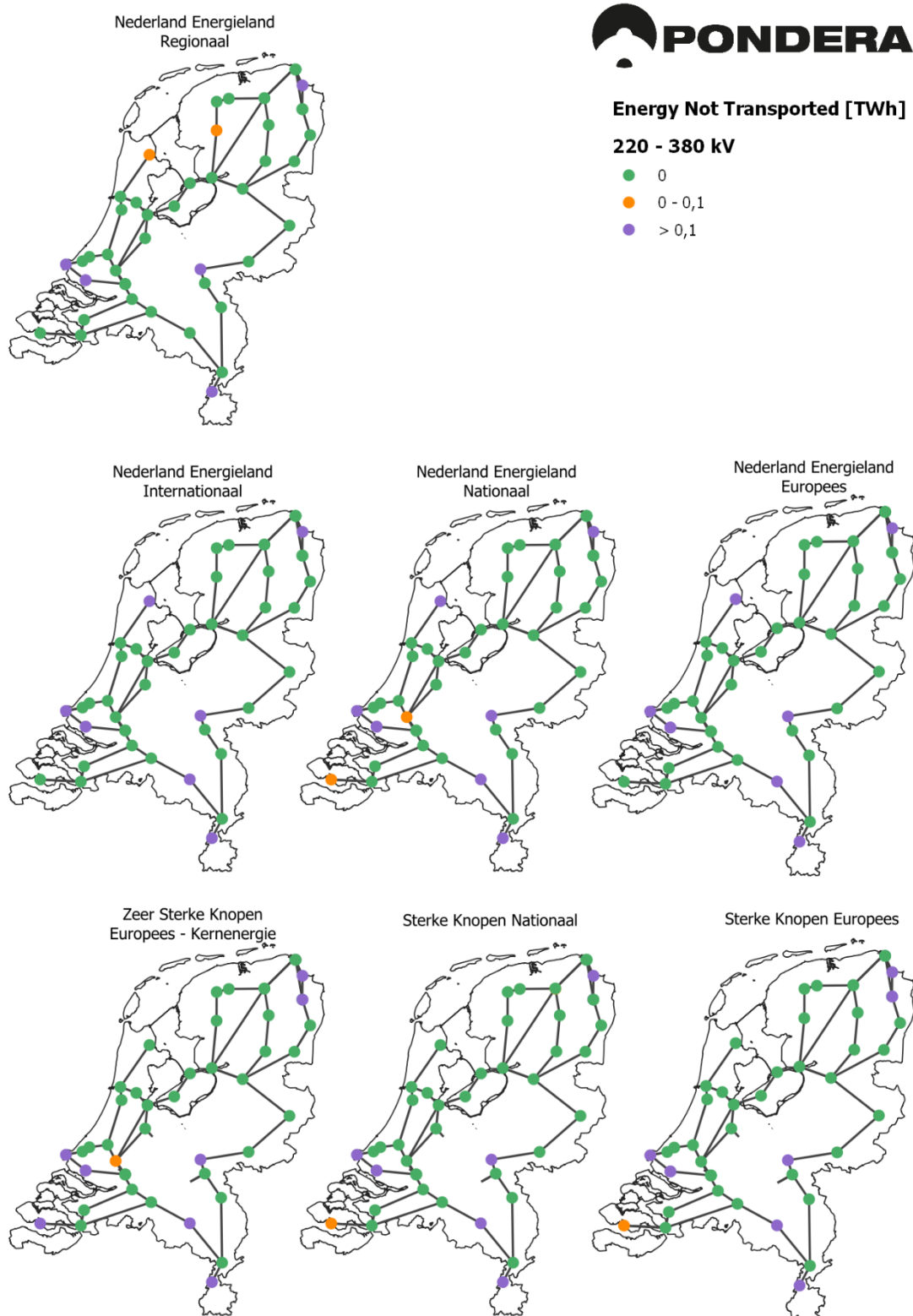
Verder vinden in sommige scenario's knelpunten plaats bij de 380kV-stations Borssele/Sloegebied, Eemshaven, Krimpen aan de IJssel, Meeden en Middenmeer en bij de 220kV-stations Meeden, Oudehaske en Vierverlaten¹⁴.

In het scenario Nederland Energieland Nationale Sturing zijn er de meeste knelpunten bij 380kV- en 220kV-transformatoren. Dit komt vermoedelijk door de hoge mate van elektrificatie en de forse hoeveelheid hernieuwbare elektriciteitsproductie in dit scenario.

¹³ De overbelasting op het station Maasvlakte wordt vooral veroorzaakt doordat in Rotterdam geen loadpockets meegenomen zijn in het netmodel. Bij gebrek aan pocketvorming vindt parallel transport over de 150kV-infrastructuur plaats en vindt meer transport plaats over de 380/150kV-transformatoren.

¹⁴ De overbelasting op het station Middenmeer wordt vooral veroorzaakt doordat in Rotterdam geen loadpockets meegenomen zijn in het netmodel. Bij gebrek aan pocketvorming vindt parallel transport over de 150kV-infrastructuur plaats en vindt meer transport plaats over de 380/150kV-transformatoren.

Figuur 4-3 - Overzicht knelpunten 380kV- en 220kV-transformatoren



4.2.2 Nieuwe velden

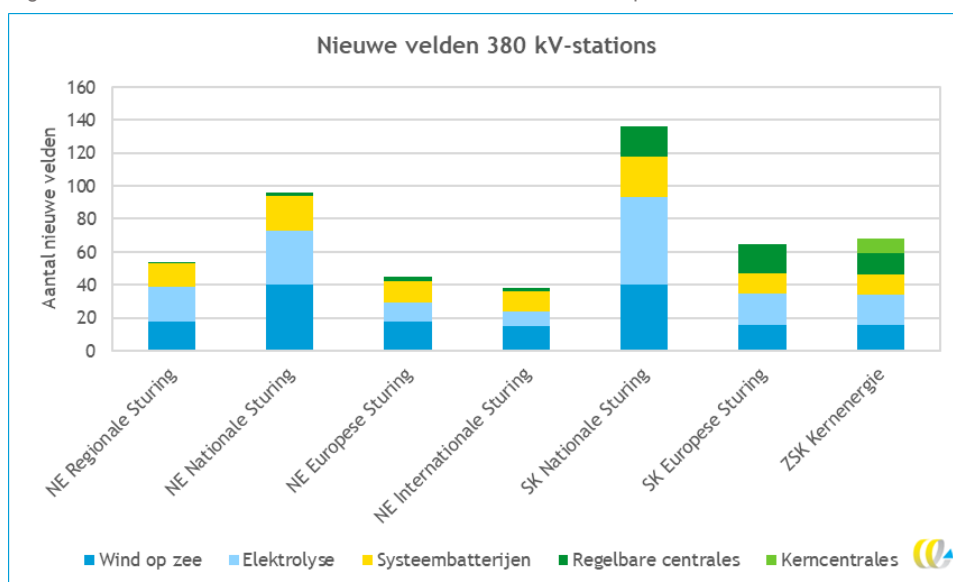
Figuur 4-4 geeft een overzicht van het aantal nieuwe velden dat nodig is bij 380kV- of 220kV-stations voor elk scenario. Hierbij wordt een opsplitsing gemaakt naar type afname of productie dat aangesloten moet worden.

Er zijn tussen de 40 en 140 nieuwe velden bij 380kV- of 220kV-stations nodig bij de scenario's. Een fors aantal van het nieuwe velden is nodig voor het aansluiten voor nieuwe windparken op zee na 2030¹⁵. Daarnaast zijn er bij de aanlandingspunten van windenergie op zee veel nieuwe velden nodig voor het aansluiten van grootschalige elektrolyzers en batterijen¹⁶.

In de scenario's Nationale Sturing zijn de meeste nieuwe velden nodig aangezien dat scenario de grootste vermogens aan windparken op zee, elektrolyzers en batterijen heeft. Bij het scenario Nederland Energieland Internationale Sturing zijn de minste nieuwe velden nodig.

Bij de Sterke Knopen-scenario's zijn meer nieuwe velden bij 380kV- of 220kV-stations dan bij de Nederland Energieland-scenario's. Dit komt doordat elektrolyzers en regelbare centrales in die scenario's meer geclusterd worden, waardoor je in dit scenario een groter vermogen per locatie hebt. Hierdoor wordt een groter gedeelte van het vermogen direct aangesloten op een 380kV- of 220kV-station, waardoor hier meer velden nodig zijn. Bij de Nederland Energieland-scenario's wordt een groter deel van het vermogen aangesloten op 150kV- of 110kV-stations of op stations op het regionale elektriciteitsnet. Hier is niet naar gekeken.

Figuur 4-4 - Overzicht totaal aantal nieuwe velden 380kV-stations per scenario



¹⁵ Voor het aansluiten van nieuwe windparken op zee zijn nieuwe velden nodig bij 380kV-stations. De investeringen in het IP2020 zijn voldoende om de hoeveelheid windenergie op zee uit het meest ambitieuze scenario voor 2030 van het investeringsplan aan te sluiten. Het gaat daarin om 14,6 GW.

¹⁶ 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.

Tabel 4-1 geeft een overzicht van het aantal nieuwe velden dat nodig is per locatie. Dit is afhankelijk van op welke locaties windenergie op zee aanlandt en elektrolyzers, batterijen en regelbare centrales geplaatst worden. Bij de aanlandingslocaties van windenergie op zee zijn veel nieuwe velden nodig. Dit is onder meer om de windparken op zee aan te sluiten. Maar op deze locaties worden in de meeste scenario's ook grootschalige elektrolyzers en batterijen geplaatst.

Tabel 4-1 - Aantal nieuwe velden bij 380- en 220kV-stations per scenario, uitgesplitst naar locatie

Locatie ¹⁷	NE ¹⁸ Regionale Sturing	NE Nationale Sturing	NE Europese Sturing	NE Internationale Sturing	SK Nationale Sturing	SK Europese Sturing	ZSK Kern- energie
Delfzijl	1	2	0	0	1	7	6
Amsterdam	0	0	0	0	4	4	3
Beverwijk	4	8	3	3	10	2	2
Diemen	0	0	0	0	14	0	0
Den Helder	0	0	0	0	18	2	2
Medemblik	1	0	0	0	0	0	0
Botlek	0	2	0	1	1	6	6
Maasvlakte	17	31	14	11	26	9	12
Borsele	2	3	2	2	10	8	12
Terneuzen	3	4	2	1	0	2	2
Geertruidenberg	0	0	0	0	5	0	0
Lelystad	1	1	0	0	0	0	0
Leudal	0	0	0	0	1	1	1
Maasbracht	0	0	0	0	17	2	2
Eemshaven	7	13	7	5	24	16	14
Chemelot	0	0	0	0	1	5	5
Middenmeer	18	31	16	14	4	1	1
Geervliet	0	1	1	1	0	0	0

¹⁷ Bij sommige van deze locaties is momenteel nog geen 380kV- of 220kV-station en is dat ook nog niet gepland. Op die locaties moet dan mogelijk een nieuw station ontwikkeld worden. In sommige gevallen kan het mogelijk zijn om de vermogens aan te sluiten op een lokaal 150- of 110kV-station of op een nabijgelegen 380kV-station (bijv. bij Middenmeer in het geval van Medemblik).

¹⁸ NE staat voor Nederland Energieland, SK voor Sterke Knopen en ZSK voor Zeer Sterke Knopen.

5 Resultaten gastransportnetten

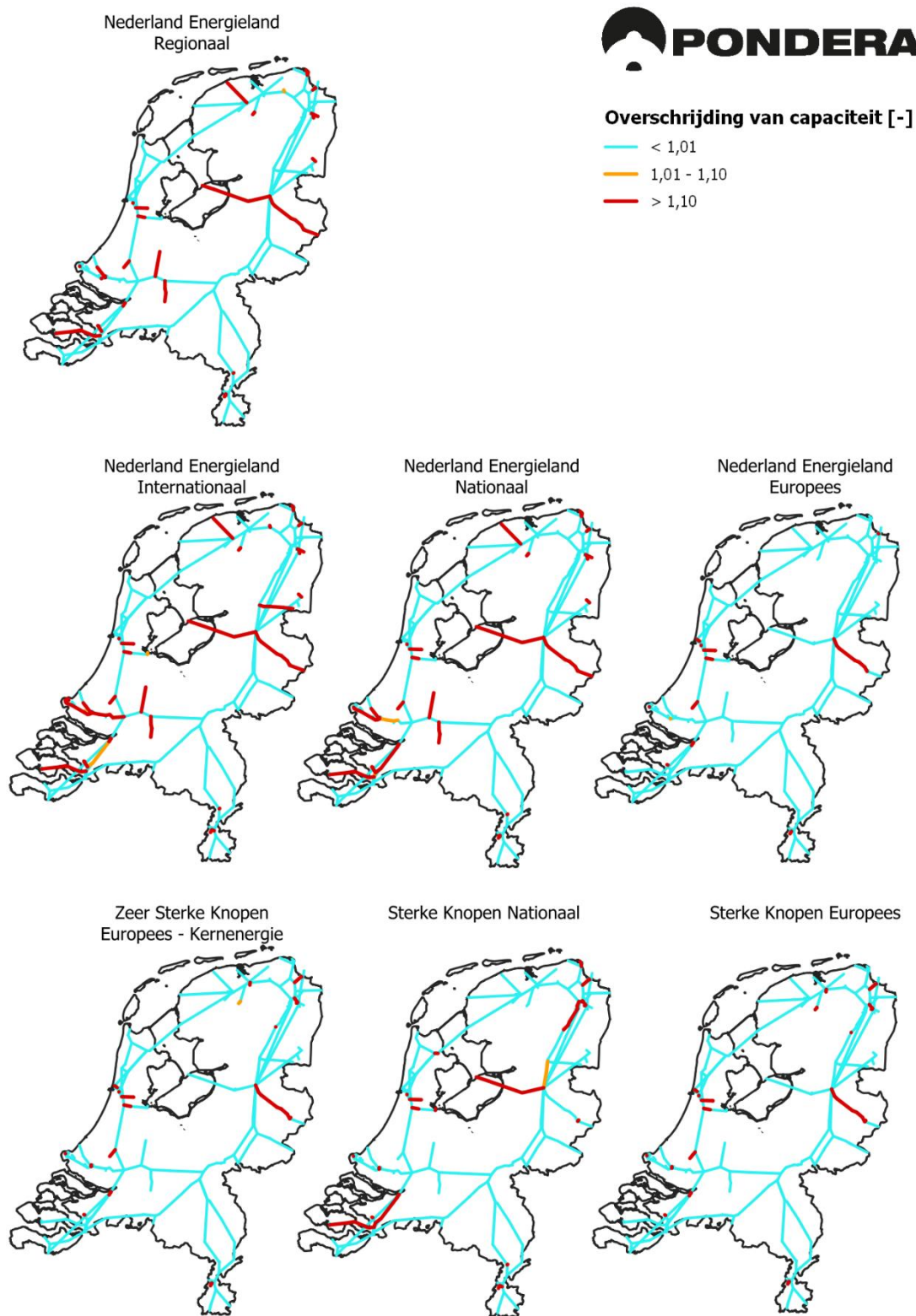
De resultaten voor de knelpunten in de gastransportnetten zijn verdeeld in knelpunten in het waterstofnet (H-gasnetwerk) en het methaannet (L-gasnetwerk). De modelering is niet gedetailleerd genoeg om input te geven voor een ruimtelijke analyse voor de regionale netten, meet- en regelstations of boosterstations. Deze worden hier dus buiten beschouwing gelaten. Eerst volgt een overzicht van de uit de doorrekening volgende knelpunten. Daarna volgt een shortlist van knelpunten die mogelijk een ruimtelijke reservering vragen.

5.1 Waterstofnet

Figuur 5-1 geeft een overzicht van alle knelpunten in het waterstofnetwerk uit de modeldoorrekening van de netbeheerders. In het model wordt het huidige H-gasnetwerk ingezet voor waterstof. De kleuren geven de ernst van een knelpunt aan. Bij de rode verbindingen is de overschrijding meer dan 10% en is het knelpunt significant (knelpunten tot 10% vallen binnen de onzekerheidsmarge van de modellering, zie paragraaf 2.3.2). Er zijn alleen knelpunten te zien bij aftakkingen van het Nationaal Waterstofnetwerk. Het waterstofnetwerk zelf heeft voldoende transportcapaciteit in elk van de scenario's.

De meeste knelpunten bij aftakkingen komen door elektriciteitscentrales die op waterstof draaien in 2050. In het Europese scenario zijn minder knelpunten zichtbaar in het waterstofnet. Dit komt doordat hier methaan een grote rol speelt in plaats van waterstof, onder andere in elektriciteitscentrales, en in opslag van gas. Hierdoor is minder waterstoftransport nodig. Daarnaast ontstaan knelpunten door het transport vanaf waterstopslaglocaties naar het Nationaal Waterstofnetwerk, transport vanaf elektrolyzers naar het Nationaal Waterstofnetwerk en door waterstofvraag van de industrie.

Figuur 5-1 - Knelpunten in het waterstofnet in 2050 voor alle scenario's. Rood is een overschrijding van meer dan 10%



5.2 Methaannet

In de doorrekening van het model wordt het L-gasnetwerk ingezet voor methaan in alle scenario's voor 2050. In de meeste scenario's is door een afname in vraag naar methaan dit netwerk van voldoende capaciteit in 2050, met de uitzondering van enkele aftakkingen.

In het Europese scenario ontstaan knelpunten op de Maasvlakte, tussen Borssele/Sloegebied en Bergen op Zoom en bij de aansluiting van de Flevocentrale. In het Europese scenario is een groei van de industrie voorzien en wordt zowel methaan als waterstof ingezet om in die vraag te voorzien. Het is onzeker of de knelpunten op de Maasvlakte en tussen Borssele/Sloegebied en Bergen op Zoom ontstaan als er geen groei van de industrie plaatsvindt. Daarnaast wordt zowel methaan als waterstof ingezet in de gebouwde omgeving in dit scenario. Omdat het huidige net een grotere capaciteit aankan dan in 2050 aan methaaninzet is voorzien, wordt er geen aanvullend ruimtebeslag in de methaaninfrastructuur verwacht.

5.3 Shortlist van knelpunten in het waterstofnet

Omdat een groot aantal van de knelpunten die volgen uit de doorrekening een direct gevolg zijn van de modelaannames, hebben we, samen met Gasunie, de knelpunten die volgen uit de doorrekening nader bekeken. Deze analyse had als doel uit de totaalijst aan knelpunten de knelpunten te selecteren die niet onder de modelgevoeligheid vallen, en mogelijk een knelpunt geven in de toekomst. De shortlist die hieruit volgt is input voor o.a. de effectbeoordeling en de welvaartsanalyse.

Voor de knelpunten die een overschrijding hebben van meer dan 10% is een analyse uitgevoerd waarbij, samen met Gasunie, per locatie is bekeken wat de mogelijke oorzaken van het knelpunt kunnen zijn (aan de vraag- en/of aanbodkant). Hiervoor is de nabijheid van locaties van opslagen, elektrolyzers en energiecentrales per knelpunt geanalyseerd.

De resultaten van de knelpunten volgen dus uit een handmatige analyse per knelpunt met een overschrijding van meer dan 10%. Tijdens meerdere werksessies samen met Gasunie zijn de knelpunten ingedeeld naar:

- knelpunten als gevolg van modelmatige aannames die naar verwachting verdwijnen bij een optimalisatie;
- mogelijk werkelijke knelpunten die waarschijnlijk met een andere configuratie opgelost kunnen worden;
- mogelijk werkelijke knelpunten die een verzwaring vereisen.

De resterende knelpunten zijn ingedeeld naar de verschillende structuurkeuzes, op basis van de waarschijnlijke oorzaken en door de verschillen in mate van overschrijding per scenario te vergelijken.

Tabel 5-1 - Shortlist van knelpunten in het waterstofnet

Van	Naar	Scenario ¹⁹	Oorzaak
Delfzijl	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	SK Nationale Sturing	Aansluiting nieuwe elektrolyzers
Maasvlakte	Aansluiting op Waterstofnetwerk Rotterdam	NE Nationale Sturing	Aansluiting nieuwe elektrolyzers
Geertruidenberg	GOS Amercentrale; voedingsstation Waalwijk; industrie GOS bij Klundert	NE Nationale Sturing	Aansluiting nieuwe elektrolyzers bij diepe aanlanding

¹⁹ NE staat voor Nederland Energieland, SK voor Sterke Knopen en ZSK voor Zeer Sterke Knopen.

Van	Naar	Scenario ¹⁹	Oorzaak
Hemweg-centrale	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	Alle scenario's	Aansluiting energiecentrale
Emmen	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	NE Nationale Sturing	Aansluiting nieuwe elektrolyzers
Maasbracht	GOS Clauscentrale	SK Nationale Sturing, NE Nationale Sturing, NE Regionale Sturing, NE Internationale Sturing.	Aansluiting energiecentrale
Diemen	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	Alle scenario's	Aansluiting energiecentrale
Rotterdam/Maasvlakte	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	SK Nationale Sturing	Aansluiting energiecentrale
Eemshaven	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	SK Nationale Sturing, NE Nationale Sturing	Aansluiting energiecentrale
Borssele/Sloegebied	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	SK Europese Sturing, NE Europese Sturing	Aansluiting energiecentrale
Utrecht-centrale	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	NE Nationale Sturing	Aansluiting energiecentrale
Schinnen	Doorgaande leiding	SK Europese Sturing, NE Europese Sturing.	Aansluiting energiecentrale
Lelystad	Ommen	SK Europese Sturing, NE Europese Sturing	Aansluiting energiecentrale
Verschillende locaties in Groningen/Drenthe/Friesland	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	SK Europese Sturing, SK Nationale Sturing	Aansluiting opslag in zoutcavernes
Grijpskerk	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk	SK Europese Sturing	Aansluiting opslag in bestaande aardgasopslagen
Zuidwending	Aansluiting op Nationaal Waterstofnetwerk (vanaf SVB strook Groningen Ommen)	NE Europese Sturing, NE Nationale Sturing	Aansluiting opslag in zoutcavernes
Grijpskerk	Nationaal Waterstofnetwerk	SK Nationale Sturing	Aansluiting opslag in zoutcavernes
Ommen	Twente	SK Europese Sturing, NE Europese Sturing, NE Nationale Sturing	Opslag in Epe, Duitsland
Rotterdam	Chemelot/Ruhr 1 ^e leiding	Delta Rhine Corridor NE Nationale Sturing	Import voor wederexport
Rotterdam	Chemelot/Ruhr 2 ^e leiding	Delta Rhine Corridor na 2030	Import voor wederexport

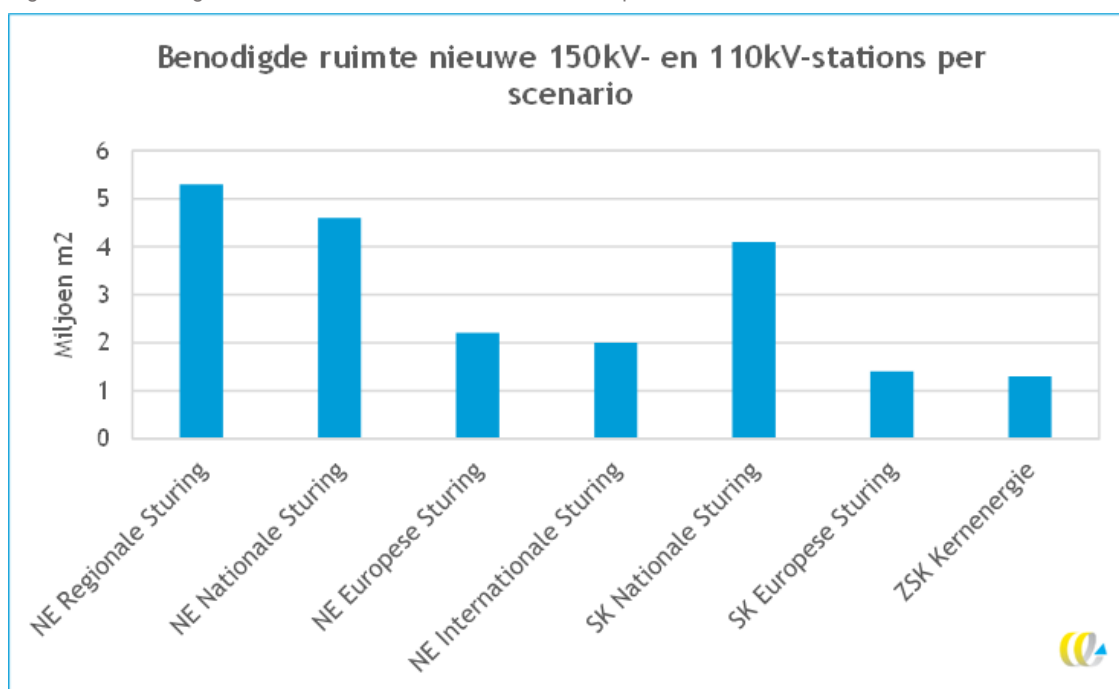
6 Resultaten regionale netten

6.1 Elektriciteitsnetten

De doorrekeningen van de regionale elektriciteitsnetten zijn wel een stuk minder uitgebreid dan de doorrekeningen van de hoogspanningsnetten. De regionale netbeheerders hebben alleen de koppelpunten tussen het regionale net en het hoogspanningsnet doorgerekend. Zit zijn de 150kV- en 110kV-stations. Hierbij wordt niet gekeken naar individuele stations. Wel wordt een inschatting gemaakt van de totale ruimte die noodzakelijk is voor nieuwe stations. Er is hierbij gekeken naar ruimte voor nieuwe transformatoren en nieuwe velden.

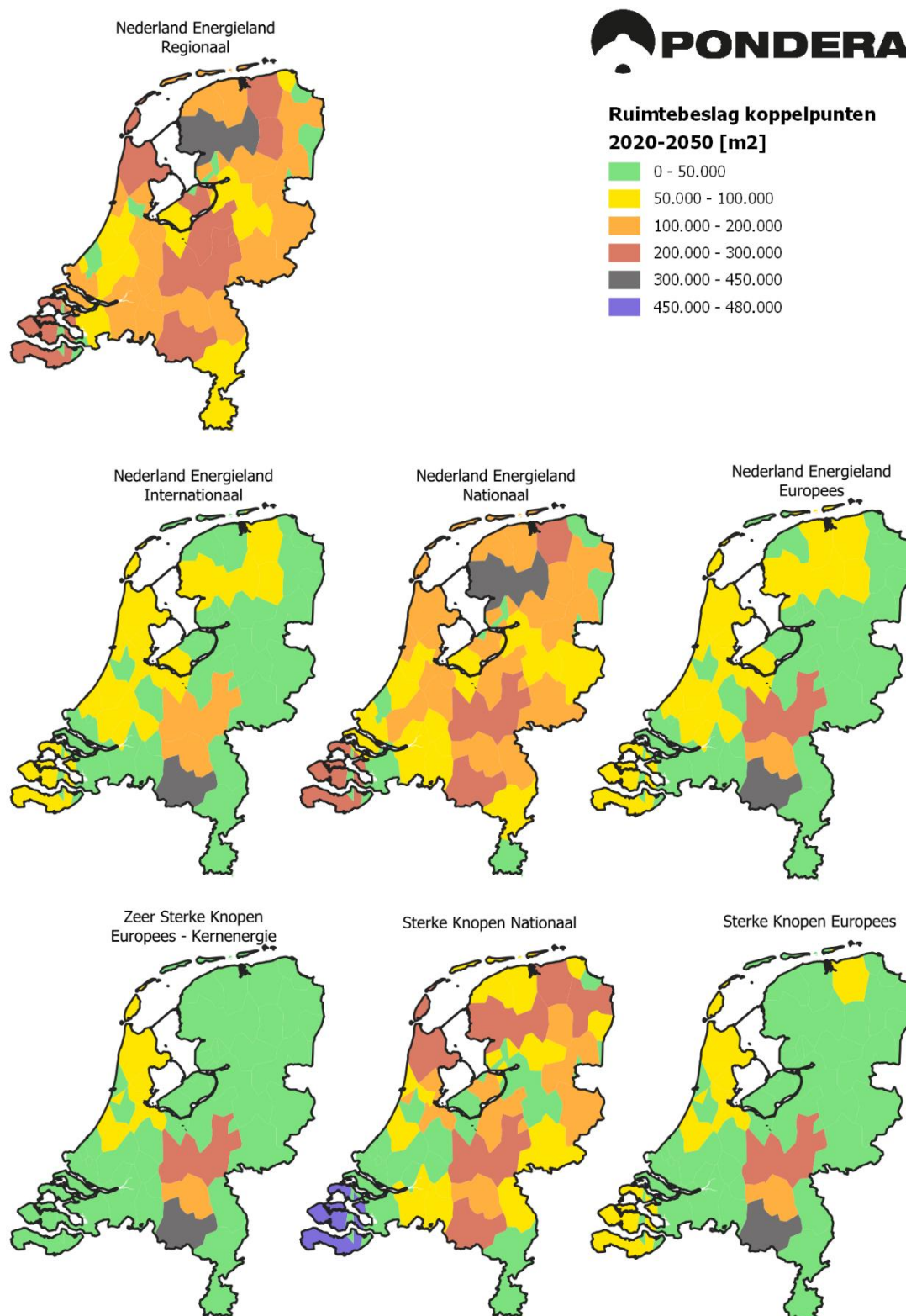
Figuur 6-1 geeft een overzicht van de benodigde ruimte voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations per scenario. In de scenario's met de meeste hernieuwbare opwek (Regionale Sturing, Nationale Sturing) is de meeste ruimte nodig voor nieuwe stations. In de Sterke Knopen- en Zeer Sterke Knopen- scenario's is minder ruimte nodig voor nieuwe stations door clustering van hernieuwbare opwek op land en toepassing van kernenergie.

Figuur 6-1 - Benodigde ruimte nieuwe 150kV- en 110kV-stations per scenario



Figuur 6-2 geeft een geografische uitsplitsing van de benodigde ruimte voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations. Per voorzieningsgebied van 380kV- en 220kV-stations wordt aangegeven hoeveel ruimte nodig is voor nieuwe 150kV- en 110kV-stations.

Figuur 6-2 - Geografische uitsplitsing benodigde ruimte nieuwe 150kV- en 110kV-stations per scenario



6.2 Gasnetten

Er zijn geen doorrekeningen gemaakt van regionale gasnetten.

A. Oplossingsrichtingen elektriciteit

Binnen de IEA voor het PEH moeten er 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 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.

In de analyse worden non-infra-oplossingen niet meegenomen, 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 wordt behandeld in de Bijlagen *Beoordeling Milieu & Ruimte (Robuuste) ontwikkelingen* en *Beoordeling Milieu & Ruimte structuurkeuzes en systeemontwikkelingen*.

A.1. Scope

Voor hoogspanningsinfrastructuur worden zowel verbindingen als stations beschouwd.

Bij de verbindingen wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende spanningsniveaus van het hoogspanningsnet, dus 380, 220, 150 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 (bijv. 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.

A.2. 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 verzaamd 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. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende vormen van nieuwe infrastructuur:
 - **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) loadpockets²⁰.** Indien er knelpunten op 150kV- of 110kV-verbindingen optreden kunnen loadpockets ingesteld worden²¹. Als er al loadpockets zijn kunnen de bestaande pockets 'opgeknippt' worden in kleinere pockets. Er kan ongeveer 1 GW vraag en 1,5 GW opwek binnen een loadpocket aangesloten worden.

²⁰ 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.

²¹ In het netmodel is de pocketstructuur voor het gehele 150kV- en 110kV-net meegenomen, behalve in de kop van Noord-Holland en de regio Rotterdam.

Categorisatie knelpunten

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)²². De verschillende classificaties worden in de figuren aangegeven met kleuren.

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.

Hieronder staat een overzicht van de oplossingsrichtingen per type knelpunt. Er wordt dus 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 verzawaard worden met 4kA-geleiders.

Tabel 6-1 - 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 zijn voor de categorieën. Bij stations worden drie categorieën (geen, licht, zwaar) gehanteerd.

Tabel 6-2 - Grenzen categorieën

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

²² 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.

A.3. 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 erbij komt voor deze bovenstaande categorieën. Op basis van het additionele vermogen dat per locatie aangesloten moet worden, is 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 oplossingsrichtingen:

- 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.
- (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.
- 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.