

# Beoordeling systeemintegratie

## Bijlage B – IEA Programma VAWOZ



Datum: 27-06-2025  
Versienummer: 5.1  
Status: Definitief

In opdracht van:



Ministerie van Klimaat en  
Groene Groei

# INHOUDSOPGAVE

Samenvatting .....	4
1 Inleiding.....	10
1.1 Wat is systeemintegratie?.....	10
1.2 Opzet beoordeling systeemintegratie.....	11
1.3 Verdiepend onderzoek voor beoordeling .....	12
1.4 Welke potentiële aanlandingen worden beoordeeld? .....	18
1.5 Leeswijzer .....	19
2 Breder perspectief systeemintegratie wind op zee .....	20
2.1 Wat zijn belangrijke aspecten voor de systeemintegratie van wind op zee?.....	20
2.2 Nationale systeemkeuzes.....	21
2.3 Optimale inpassing energie-infrastructuur .....	25
2.4 Samenhang met overige ontwikkelingen van het energiesysteem .....	28
3 Methodiek beoordeling systeemintegratie .....	32
3.1 Introductie.....	32
3.2 Algemene uitgangspunten .....	32
3.3 Beoordeelde effecten.....	33
3.4 Beoordelingsmethodiek elektrische aanlandingen.....	34
3.5 Beoordelingsmethodiek waterstofaanlandingen.....	40
3.6 Beoordelingsmethodiek elektrolyzers .....	43
3.7 Samenhang tussen de verschillende onderdelen .....	47
4 Regio-overstijgende resultaten.....	49
4.1 Elektrische aanlandingen .....	49
4.2 Waterstofaanlandingen .....	51
5 Gevoeligheidsanalyses .....	53
5.1 Nationale systeemkeuzes.....	53
5.2 Ontwikkeling elektrolyse en overige flexibiliteit.....	56
5.3 Ontwikkeling industrieclusters.....	58
5.4 Scenario's met meer kernenergie .....	59
5.5 Scenario's zonder netuitbreiding Randstad .....	61
5.6 Aanlanding in Lelystad .....	61
6 Beoordeling Noord-Nederland .....	63
6.1 Omschrijving regio .....	63

6.2	Beoordeling elektrische aanlandingen.....	64
6.3	Beoordeling waterstofverbindingen .....	69
6.4	Beoordeling elektrolyse .....	70
6.5	Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers.....	74
7	Beoordeling Kop van Noord-Holland .....	76
7.1	Omschrijving regio .....	76
7.2	Beoordeling elektrische aanlandingen.....	78
7.3	Beoordeling waterstofverbindingen .....	81
7.4	Beoordeling elektrolyse .....	82
7.5	Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers.....	86
8	Beoordeling Noord-Holland Zuid .....	88
8.1	Omschrijving regio .....	88
8.2	Beoordeling elektrische aanlandingen.....	90
8.3	Beoordeling waterstofverbindingen .....	95
8.4	Beoordeling elektrolyse .....	96
8.5	Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers.....	100
9	Beoordeling Zuid-Holland .....	101
9.1	Omschrijving regio .....	101
9.2	Beoordeling elektrische aanlandingen.....	104
9.3	Beoordeling waterstofverbindingen .....	108
9.4	Beoordeling elektrolyse .....	109
9.5	Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers.....	113
10	Beoordeling Noord-Brabant en Limburg.....	115
10.1	Omschrijving regio .....	115
10.2	Beoordeling elektrische aanlandingen.....	117
10.3	Beoordeling elektrolyse .....	121
10.4	Samenhang tussen elektrische aanlandingen en elektrolyzers .....	126
11	Beoordeling Zeeland .....	127
11.1	Omschrijving regio .....	127
11.2	Beoordeling elektrische aanlandingen.....	129
11.3	Beoordeling elektrolyse .....	133
11.4	Samenhang tussen elektrische aanlandingen en elektrolyzers .....	137
12	Conclusies.....	138
12.1	Elektrische aanlandingen .....	138
12.2	Waterstofaanlandingen .....	142
12.3	Grootschalige elektrolyzers op land.....	143

12.4	Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyse.....	147
13	Toekomstvastheid – relevante inzichten systeemintegratie .....	148
	Referenties.....	160
	Bijlage A. Plan van aanpak integrale netdoorrekeningen TenneT en Gasunie.....	161
A.1	Algemene uitgangspunten doorrekeningen .....	161
A.2	Scenario's en configuraties .....	161
	Bijlage B. Verschillen- en gevoeligheidsanalyses .....	166

## Samenvatting

### **Diepe aanlandingen niet langer in pVAWOZ, inzichten systeemintegratie wel opgenomen in dit rapport**

In pVAWOZ is ook onderzoek gedaan naar diepe aanlandingen. Uitgangspunt voor pVAWOZ voor de zogenaamde 'diepe aanlandingen van wind op zee' naar Tilburg, Maasbracht en Graetheide was de situering van de benodigde kabels in de buisleidingenstrook van de Delta Rhine Corridor (DRC). De minister heeft in december 2024 echter besloten om gelijkstroomkabels uit de DRC te halen om snelheid te kunnen maken met de ontwikkeling van het waterstofnetwerk en een CO<sub>2</sub>-verbinding. Met het ontbreken van een tracé voor deze kabels zijn de onderzoeken naar diepe aanlandingen voor pVAWOZ komen te vervallen.

Daarom is door het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) een nieuw onderzoekstraject gestart voor aanlandingen van wind op zee diep landinwaarts. De inzichten over diepe aanlanding vanuit Systeemintegratie zijn echter nog wel opgenomen in dit rapport. In deze verkenning diepe aanlandingen worden ook de inzichten uit dit rapport meegenomen.

### **Context beoordeling systeemintegratie**

Dit rapport bevat de beoordeling Systeemintegratie van de Integrale Effectenanalyse (IEA) van pVAWOZ. Het thema Systeemintegratie is één van de zes thema's van de IEA binnen het programma. In het pVAWOZ wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee onderzocht. Daarbij gaan we uit van de realisatie van de routekaart windenergie op zee 21 GW. Er is aangenomen dat na de realisatie van de routekaart tien elektrische aanlandingen en één of twee waterstofaanlandingen gerealiseerd worden, met een totaal vermogen van 29 GW (bovenop de routekaart). Het realiseren van maximaal 50 GW wind op zee in 2040 is het uitgangspunt van het onderzoek, maar de ontwikkelingen in de komende jaren moeten bepalen hoeveel wind op zee gerealiseerd kan worden en noodzakelijk is.

Bij de beoordeling systeemintegratie kijken we naar de impact van de aanlanding van wind op zee op het energiesysteem. Daarbij zijn de effecten beoordeeld van aanlanding van wind op zee, op de verschillende potentiële aansluitlocaties. De focus bij de beoordeling ligt op de impact op de energie-infrastructuur op land. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen aanlandingen in de vorm van waterstof en elektriciteit. Deze aspecten zijn separaat beoordeeld. Daarnaast vindt er ook een beoordeling van de mogelijkheid tot inpassing van grootschalige elektrolyzers bij de aansluitlocaties voor elektrische aanlandingen plaats. We gaan ook in op de samenhang tussen deze aspecten.

Voor het bepalen van de effecten van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur zijn integrale netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie uitgevoerd. In deze doorrekeningen wordt een inschatting gemaakt van de effecten van verschillende scenario's op het hoogspanningsnet en de landelijke waterstofinfrastructuur.

De analyses zijn uitgevoerd voor het zichtjaar 2040, het vooraf voorziene eindpunt van de tijdshorizon van het Programma VAWOZ. Bij de beoordeling *Toekomstvastheid* wordt ook gekeken naar het tijdspad in de periode in 2031-2040 en wordt een doorkijk gegeven richting 2050. Deze inzichten zijn ook opgenomen in dit rapport.

### Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van de netbeheerders leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

### Beoordeling elektrische aanlandingen

Bij de elektrische aanlandingen zijn de effecten op de hoeveelheid aan nieuwe infrastructuur tot de aansluitlocatie, de beschikbare aansluitcapaciteit op het 380kV-station bij de aansluitlocatie, de effecten op de afvoerende 380kV-verbindingen en de totale effecten op het volledige 380kV-net beoordeeld. Voor de keuze tussen stations binnen de regio is de aansluitcapaciteit van de stations leidend. Voor het maximum aantal aansluitingen per regio is de capaciteit van de afvoerende 380kV-verbindingen leidend.

Tabel 0-1 geeft een totaaloverzicht van de beoordeling van de elektrische aanlandingen.

Tabel 0-1 Overkoepelende beoordeling elektrische aanlanding

Aansluitlocatie	Impact afvoerende 380kV-verbindingen	Route op zee	Aansluitcapaciteit
<b>Kop van Noord-Holland</b>	-Geen ingreep bij één aanlanding, twee 380kV-circuits voldoende. -Bij vier 380kV-circuits richting Kop van Noord-Holland tot drie aanlandingen, zonder (aanvullende) grote ingreep. -Onzekerheid door de in onderzoek zijnde Netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding maximaal één aanlanding zonder grote ingreep.		
NNHN-noord		Kort/ gemiddeld	Twee aanlandingen zonder ingreep. Nader onderzoek nodig voor eventuele derde.
<b>Noord-Holland Zuid</b>	-Twee aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW zonder grote ingreep, in basisscenario's. -Onzekerheid door de in onderzoek zijnde Netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding maximaal één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland zonder grote ingreep.		
A9-Zuid		Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
NNHN-zuid		Kort/ gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Vijfhuizen		Gemiddeld	Eén aanlanding met beperkte ingreep
Velsen		Kort	Eén 700 MW aanlanding met beperkte ingreep
<b>Zuid-Holland</b>	-Scenario Nationaal Leiderschap: twee of drie aanlandingen zonder grote ingreep. -Scenario Europese Integratie: één of twee aanlandingen zonder grote ingreep. -Bij twee grote kerncentrales <sup>1</sup> : nul of één aanlanding zonder grote ingreep. -Onzekerheid door de in onderzoek zijnde Netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding maximaal één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland zonder grote ingreep.		
Simonshaven		Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Bleiswijk		Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Wateringen		Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Europoort		Gemiddeld	Twee aanlandingen zonder ingreep

<sup>1</sup> Small Modular Reactors (SMR's) zijn niet meegenomen in de analyses, alleen grootschalige kerncentrales.

<b>Zeeland</b>	-Twee aanlandingen zonder grote ingreep, in basisscenario's. -Bij twee grote kerncentrales: één aanlanding zonder grote ingreep.		
Slogebied		Lang	Eén aanlanding zonder ingreep
Terneuzen		Lang	Tot twee aanlandingen zonder ingreep.
<b>Noord-Brabant en Limburg</b>	Positieve impact op netbelasting tot vier elektrische verbindingen, voor alle onderzochte scenario's.		
Moerdijk		Lang	Twee aanlandingen zonder ingreep
Tilburg		Lang	Eén aanlanding met beperkte ingreep
Maasbracht		Lang	Geen aanlanding zonder grote ingreep
Graetheide		Lang	Twee aanlandingen zonder ingreep
<b>Noord-Nederland</b>	-Twee of drie aanlandingen mogelijk zonder grote ingreep, in basisscenario's -Bij twee grote kerncentrales: één aanlanding zonder grote ingreep.		
Oostpolder		Kort/ gemiddeld	Tot vier aanlandingen mogelijk zonder grote ingreep. Onderzoek nodig of vier aanlandingen mogelijk zijn vanuit beheersbaarheid en systeemstabiliteit.

De belangrijkste conclusies van de beoordeling van de elektrische aanlandingen zijn:

- Het is vanuit systeemintegratie gezien gunstig om in te zetten op spreiding van elektrische aanlanding en op aanlanding in alle regio's in te blijven zetten. Elke regio heeft een maximale hoeveelheid aanlanding die mogelijk is voordat ingrepen bij de 380kV-verbindingen in de regio noodzakelijk zijn. Bij spreiding is het mogelijk om zoveel mogelijk binnen die grenzen te blijven, bij clustering niet.
- Het maximaal aantal elektrische aanlandingen dat per regio ingepast kan worden zonder grote ingrepen is in theorie voldoende voor het realiseren van tien elektrische aanlandingen. Maar er zijn in elke regio afhankelijkheden en onzekerheden, die ertoe kunnen leiden dat minder elektrische aanlandingen zonder grote ingrepen ingepast kunnen worden. De belangrijkste onzekerheden en afhankelijkheden zijn de ontwikkeling van grote kerncentrales, de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag en flexibiliteit en de (tijdige) realisatie van netuitbreiding in de Randstad en diepe aanlanding.
  - Een belangrijke onzekerheid voor elektrische aanlanding in Noord- en Zuid-Holland is de (tijdige) realisatie van de netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding is elektrische aanlanding in deze regio's uitdagend en lijkt slechts één aanlanding in de kop van Noord-Holland en één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland mogelijk. Deze netuitbreiding is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding onzeker.
  - De eventuele ontwikkeling van grote kerncentrales heeft impact op de hoeveelheid elektrische aanlanding die zonder grote ingrepen mogelijk is in de regio's Zuid-Holland, Zeeland en Noord-Nederland. Er is onderzoek gedaan naar twee tot vier grote kerncentrales in totaal, en maximaal twee per regio.
  - Alle analyses die gedaan zijn gaan uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag en flexibele bronnen (zoals elektrolyse) richting 2040. Het is belangrijk dat deze vraag en

flexibiliteit er ook komt. Anders zijn minder elektrische aanlandingen inpasbaar in alle regio's. Dat geldt ook voor onderstaande no-regrets vanuit systeemintegratie bezien.

- De bovenstaande afhankelijkheden en onzekerheden zorgen ervoor dat het lastig is om te bepalen wat, vanuit systeemintegratie, de meest optimale verdeling is van de elektrische aanlandingen. Het is daarom belangrijk om de bevindingen periodiek te herijken en waar mogelijk meer duidelijkheid te creëren.
- Er zijn vanuit systeemintegratie zes elektrische aanlandingen die in alle onderzochte scenario's en gevoeligheidsanalyses inpasbaar lijken zonder grote ingrepen. Het gaat om één aanlanding in Zeeland, twee elektrische aanlandingen bij Moerdijk/Geertruidenberg, één aanlanding in de Eemshaven, één aanlanding in de kop van Noord-Holland en één aanlanding in Noord-Holland Zuid of Zuid-Holland. Er is voor deze aanlanding naar verwachting ook voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar. Dit zijn dus, vanuit systeemintegratie bezien, no-regrets (bij voldoende ontwikkeling van de elektriciteitsvraag).
- Diepe aanlanding naar Tilburg en/of Limburg valt niet meer in de scope van pVAWOZ, maar vanuit de beoordeling systeemintegratie is er wel reden om op diepe aanlanding in te blijven zetten. In alle regio's zijn er uitdagingen voor de inpassing van elektrische aanlandingen, dus daarmee maakt diepe aanlanding het makkelijker om maximaal tien elektrische aanlandingen te realiseren. Daarnaast kan dit de belasting op de 380kV-verbindingen in Noord-Brabant en Limburg verminderen.

### **Beoordeling waterstofaanlandingen**

Voor de beoordeling van systeemintegratie met betrekking tot de waterstofaanlandingen worden de mogelijke effecten op het algehele waterstofnetwerk ten gevolge van de aanlanding van wind op zee beoordeeld. Concreet wordt bekeken of netwerkuitbreidingen (ingrepen) nodig zijn. Hierbij zijn de effecten op de hoeveelheid aan nieuwe infrastructuur tot zee, nieuwe infrastructuur vanaf de kust tot aan het nationale netwerk en de effecten op het nationale Waterstofnetwerk Nederland (WNL) beoordeeld.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken uit de beoordeling van de verschillende aanlandregio's voor waterstofaanlanding:

- Bij aanlanding in de Eemshaven, Grijskerk of de Kop van Noord-Holland zijn de minste ingrepen nodig.
- Aanlanding in de Kop van Noord-Holland en Grijskerk is afhankelijk van tijdige realisatie van het uitrolplan van het Waterstofnetwerk Nederland, met name van de IJsselmeerroute.
- Bij waterstofaanlanding in Noord-Holland Zuid en de Eemshaven is complexiteit voor het realiseren de route vanaf de kust naar het Waterstofnetwerk relatief groot doordat het een druk gebied is met veel ontwikkelingen, waardoor er weinig ruimte is in de ondergrond.
- Waterstofaanlanding in Zuid-Holland komt duidelijk als het meest ongunstig naar voren uit de beoordeling, aangezien bij aanlanding in die regio een grote ingreep nodig is aan het WNL. Daarnaast is het een lange route op zee en is de realisatie aansluitleiding vanaf de kust tot aan het WNL erg complex.

### **Beoordeling elektrolyzers**

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Bij de beoordeling Systeemintegratie ligt de focus op grootschalige elektrolyzers die direct aangesloten worden op 380kV-stations (vanaf ongeveer 500 MW), aangezien de convertorstations voor elektrische aanlandingen van wind op zee ook op 380kV-stations aangesloten worden. Voor elektrolyzers is per regio beoordeeld of het

plaatsen van grootschalige elektrolyzers **haalbaar** (binnen de bestaande en geplande energie-infrastructuur) en **gunstig** is voor systeemintegratie.

Er zijn nu ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. Voor de meeste van deze plannen is echter nog geen investeringsbeslissing genomen. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers (en de mate van concreetheid van deze plannen), ten opzichte van de hoeveelheid elektrolyse die aangenomen voor scenario's van 2040. Dit geeft inzicht in welke regio's extra elektrolyse nodig is, en geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De belangrijkste conclusies over de beoordeling van de elektrolyzers zijn:

- In de Kop van Noord-Holland, Noord-Holland Zuid, Zuid-Holland, Zeeland, Noord-Nederland en de regio Moerdijk/Geertruidenberg hebben elektrolyzers naar verwachting een gunstige impact op de belasting van HS-verbindingen en gunstig voor systeemintegratie. Bij diepe aanlanding in Tilburg en/of Limburg is het realiseren van grootschalige elektrolyse, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk.
- Grootschalige elektrolyse lijkt (met de huidige inzichten) aangesloten te kunnen worden op alle nieuwe 380kV-stations. Bij de bestaande 380kV-stations is minder aansluitcapaciteit beschikbaar en is dit uitdagender, voor zekerheid is een detailanalyse op stationsniveau nodig. Voor kleinere elektrolyzers (kleiner dan 500 MW) kan ook gekeken worden naar aansluiten op 150kV-stations.
- In de meeste regio's is naar verwachting nog extra elektrolyse wenselijk boven op de bestaande plannen. Daarnaast zijn de huidige plannen erg onzeker omdat er nog vrijwel geen definitieve investeringsbeslissingen genomen zijn.

### **Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers**

De elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen. In de doorgerekende toekomstscenario's nemen we een forse toename van de hoeveelheid elektrolyse aan. Deze elektrolyse, of andere flexibele vraag, zal ook noodzakelijk zijn om de elektrische aanlandingen te kunnen inpassen. Flexibiliteit is in een duurzaam energiesysteem nodig om het net in balans te houden. Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken.
- Dezelfde regio's worden gebruikt voor grootschalige elektrolyzers op land, bij aansluitlocaties van elektrische aanlandingen, en waterstofaanlandingen. Dezelfde waterstofleidingen worden gebruikt voor het transport van waterstofaanbod van grootschalige elektrolyse op land en waterstofaanlandingen. In de meeste regio's heeft het voorziene Waterstofnetwerk Nederland voldoende capaciteit om beide ontwikkelingen te faciliteren.

### **Toekomstvastheid - relevante inzichten systeemintegratie**

Bij de het onderdeel Systeemintegratie beoordelen we de impact van aanlanding van wind op zee op het energiesysteem voor het zichtjaar 2040. Echter, de tijdscomponent is ook cruciaal bij de uitrol van wind op zee. Daarbij is zowel de uitrol gedurende de zichtperiode van pVAWOZ van belang als de doorkijk richting 2050. Deze tijdscomponent wordt beoordeeld in het rapport Toekomstvastheid (bijlage G), maar de relevante inzichten vanuit Systeemintegratie bespreken we ook in hoofdstuk 13 van dit rapport.

De belangrijkste inzichten voor toekomstvastheid vanuit het perspectief van Systeemintegratie zijn:

- Bij de uitrol van de elektrische aanlandingen zijn tijdige realisatie van uitbreidingen aan het hoogspanningsnet op land en de ontwikkeling van de (flexibele) elektriciteitsvraag cruciaal. Elektrische aanlandingen in Zeeland, Noord-Nederland, Moerdijk en één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland lijken als eerste in de tijd mogelijk.
- De grootste onzekerheid bij de uitrol van waterstofaanlandingen is de tijdige beschikbaarheid van de techniek voor offshore elektrolyse en de vraagontwikkeling voor groene waterstof.
- Het is de verwachting dat de elektriciteitsvraag in elk van de regio's stijgt na 2040, door verdergaande elektrificatie. Dit betekent dat de hoeveelheid elektrische aanlanding die per regio mogelijk is in 2040, in ook in 2050 mogelijk lijkt. Dit geldt niet als er andere grootschalige productiebronnen gerealiseerd worden in een regio tussen 2040 en 2050, zoals kernenergie.
- Richting 2050 zal naar verwachting meer waterstof aan land gebracht worden met dezelfde buisleidingen en dan zal het effect op het waterstofnetwerk groter zijn. Richting 2050 lijken in ieder geval de waterstofaanlandingen richting Noord-Nederland (Grijpskerk of Eemshaven) toekomstvast. Een waterstofaanlanding in de kop van Noord-Holland lijkt richting 2050 alleen gunstig in combinatie met een waterstofaanlanding in Noord-Nederland.

# 1 Inleiding

Dit rapport bevat de effectbeoordeling voor het onderdeel systeemintegratie en is onderdeel van de Integrale Effectenanalyse van het Programma VAWOZ 2031-2040 (pVAWOZ). Het thema Systeemintegratie is één van de zes thema's van de Integrale Effectenanalyse (IEA) binnen het programma.

In pVAWOZ wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee onderzocht. Daarbij gaan we uit van de realisatie van de routekaart windenergie op zee 21 GW. Er is aangenomen dat na de realisatie van de routekaart maximaal tien elektrische aanlandingen en één of twee waterstofaanlandingen gerealiseerd worden, met een totaal maximaal vermogen van 29 GW (bovenop de routekaart).

Bij de het onderdeel Systeemintegratie beoordelen we de impact van aanlanding van wind op zee op het energiesysteem voor het zichtjaar 2040. Echter, de tijdscomponent is ook cruciaal bij de uitrol van wind op zee. Deze tijdscomponent wordt beoordeeld in het rapport Toekomstvastheid (bijlage G), maar de relevante inzichten vanuit Systeemintegratie bespreken we ook in hoofdstuk 13 van dit rapport.

## 1.1 Wat is systeemintegratie?

### 1.1.1 Inleiding

Systeemintegratie heeft betrekking op de gevolgen van de aanlanding van wind op zee voor het hele toekomstige energiesysteem in Nederland. Bij systeemintegratie is de impact van windenergie op het volledige systeem van belang. Het gaat dus om de cumulatieve impact van alle aanlandingen. Daarnaast is de wisselwerking tussen verschillende verbindingen en tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyse op land van belang. Dit vraagt om een integrale benadering van het hele systeem.

Het gaat bij het onderdeel systeemintegratie specifiek om de technische en energetische inpassing. Zaken zoals kosten, ruimte en milieu zijn belangrijk voor een maatschappelijk optimale inpassing van wind op zee, maar vallen niet onder systeemintegratie. Deze thema's worden apart onderzocht.

Er wordt gekeken naar de invloed van de inpassing van windenergie op zee op de energie-infrastructuur op land, de benodigde energie-infrastructuur op zee en de (directe) benutting van windenergie. In pVAWOZ, en ook bij het thema Systeemintegratie, wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee onderzocht. Het realiseren van maximaal 50 GW wind op zee in 2040 is het uitgangspunt van het onderzoek, maar de ontwikkelingen in de komende jaren moeten bepalen hoeveel wind op zee gerealiseerd kan worden en noodzakelijk is. Een efficiënte inpassing van deze grote vermogens aan windparken op zee in het energiesysteem is een uitdaging en van groot belang.

Bij systeemintegratie is ook de wisselwerking met overige ontwikkelingen in het energiesysteem van belang, zoals kernenergie en elektrificatie van de industrie. De ontwikkeling van de energievraag, overige opwekbronnen en flexibiliteit bepalen hoe en waar de windenergie benut wordt en daarmee hoe de geproduceerde energie het meest efficiënt naar land getransporteerd kan worden (als waterstof of elektriciteit en naar welke locatie). Daardoor is de meest efficiënte inpassing van wind op zee in het energiesysteem afhankelijk van deze overige ontwikkelingen.

### Onderzoek naar diepe aanlandingen niet langer in pVAWOZ

Programma Verbindingen Aanlanding Wind Op Zee (pVAWOZ) onderzoekt waar en hoe we windenergie van zee in de toekomst met stroomkabels en waterstofleidingen aan land kunnen brengen. Uitgangspunt voor pVAWOZ voor de zogenaamde 'diepe aanlandingen van wind op zee' naar Tilburg, Maasbracht en Graetheide was de situering van de benodigde kabels in de buisleidingenstrook. De mogelijkheden voor gelijkstroomkabels via de buisleidingenstrook zou onderzocht worden in het project Delta Rhine Corridor (DRC). De minister heeft in december 2024 echter besloten om gelijkstroomkabels uit de DRC te halen om snelheid te kunnen maken met de ontwikkeling van het waterstofnetwerk en een CO2 verbinding. Zie [Kamerbrief scope en vervolg DRC](#). Met het ontbreken van een tracé voor de gelijkstroomkabels zijn de onderzoeken naar diepe aanlandingen voor pVAWOZ komen te vervallen.

Landelijke spreiding en het ver landwaarts aansluiten van een of meer elektrische aanlandingen van wind op zee is van belang om netcongestie te voorkomen. Daarom is door het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) een nieuw onderzoekstraject gestart voor aanlandingen van wind op zee diep landinwaarts. In een zogenaamde voorverkenning diepe aanlandingen brengt KGG in samenwerking met TenneT in beeld welke aansluitlocaties en welke zoekgebieden voor de routes voor stroomkabels vanuit toekomstige windparken op de Noordzee nader moeten worden onderzocht. Op basis van de voorverkenning wordt besloten of het vervolgonderzoek plaatsvindt in de vorm van een programma of een (brede) projectprocedure. In deze verkenning diepe aanlandingen worden ook de inzichten van pVAWOZ, onder meer uit dit rapport, meegenomen.

### 1.1.2 Welke factoren zijn van belang bij systeemintegratie?

Er wordt bij systeemintegratie gekeken naar de invloed van de inpassing van windenergie op zee op de energie-infrastructuur op land, de benodigde energie-infrastructuur op zee en de (directe) benutting van windenergie.

Grofweg zijn er twee aspecten van belang bij systeemintegratie van wind op zee:

- **Nationale systeemkeuzes.** Dit gaat over de vormgeving van het totale energiesysteem en inpassing van wind op zee hierin. Relevante deelaspecten hierbij zijn het systeemontwerp van de Noordzee, de benutting van windenergie (in Nederland en eventueel buitenland) en het balanceren van vraag en aanbod.
- **Optimale inpassing in energie-infrastructuur.** De energie van windparken op zee moet naar land getransporteerd worden en daar vervolgens met de infrastructuur op land doorgevoerd worden. Dit geldt zowel voor elektrische aanlandingen als waterstofverbindingen. De windenergie kan op verschillende aansluitlocaties aan land gebracht worden. Bij systeemintegratie wordt onderzocht welke verdeling van wind op zee over verschillende aanlandlocaties zorgt voor een minimale impact op de energie-infrastructuur op land.

Hierbij is ook de wisselwerking met overige onderdelen van het energiesysteem, zoals kernenergie en de ontwikkeling van (flexibele) vraag, van belang. We gaan in paragraaf 2.4 uitgebreider in op deze relevante aspecten.

## 1.2 Opzet beoordeling systeemintegratie

Bij de beoordeling systeemintegratie kijken we naar de impact van de aanlanding van wind op zee op het energiesysteem. We kijken hierbij naar de situatie in 2040, het eindpunt van de tijdshorizon van het Programma VAWOZ. We beoordelen de effecten van aanlanding van wind op zee op het energiesysteem. Binnen de beoordeling van het thema Toekomstvastheid en Tijd wordt de impact

van ontwikkelingen tot 2050 en de inpassing gedurende de periode 2031-2040 behandeld. De relevante inzichten voor Toekomstvastheid vanuit systeemintegratie bespreken we ook in dit rapport, in hoofdstuk 13.

Binnen de beoordeling Systeemintegratie van het Programma VAWOZ 2031-2040 ligt de focus op de optimale inpassing in de energie-infrastructuur. Binnen de beoordeling kijken we daarom alleen naar de impact van wind op zee op de energie-infrastructuur. We schetsen wel een breder perspectief van de systeemintegratie van wind op zee, waarin we ook ingaan op de nationale systeemkeuzes en de impact daarvan op de optimale inpassing in de energie-infrastructuur. Dit wordt behandeld in paragraaf 2.2.

In pVAWOZ, en ook bij het thema Systeemintegratie, wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee onderzocht. Daarbij gaan we uit van de realisatie van de routekaart windenergie op zee 21 GW. Er is aangenomen dat na de realisatie van de routekaart tien elektrische aanlandingen en één of twee waterstofaanlandingen gerealiseerd worden, met een totaal vermogen van 29 GW (bovenop de routekaart).

In de beoordeling nemen we aan dat het energiesysteem altijd kloppend moet zijn. Dit betekent dat we aannemen dat vraag en aanbod ten alle tijden in balans zijn en dat alle energie getransporteerd kan worden vanaf de windparken op de Noordzee naar de eindgebruikers. Bij de beoordeling wegen we mee welke uitbreidingen aan energie-infrastructuur op land noodzakelijk zijn om dit te kunnen faciliteren. Een uitgebreide versie van het beoordelingskader en de methodiek voor de beoordeling wordt besproken in hoofdstuk 3.

De analyses voor systeemintegratie worden uitgevoerd voor het zichtjaar 2040. Op dit moment is er al veel energie-infrastructuur aanwezig en tot 2040 staan al veel investeringen voor nieuwe projecten op de planning. Zo worden veel uitbreidingen gedaan aan het 380kV-net, worden de 150 kV- en 110kV-netten op een andere manier ingericht (met een pocketstructuur<sup>2</sup>) en wordt een landelijk waterstofnetwerk aangelegd. In de analyses voor de beoordeling zijn de huidige situatie en de geplande investeringen de uitgangssituatie. Dit betekent dat aangenomen wordt dat de geplande investeringen in ieder geval gerealiseerd worden. Investeringsplannen die opgenomen zijn in het investeringsplan van netbeheerders of waar een investeringsbeslissing voor is gedaan, worden meegenomen<sup>3</sup>.

## 1.3 Verdiepend onderzoek voor beoordeling

### 1.3.1 Inleiding

Om de beoordeling voor systeemintegratie te kunnen uitvoeren is inzicht nodig in de impact van wind op zee op de energie-infrastructuur op land, bij verschillende scenario's en verschillende configuraties voor de aanlanding van wind op zee. Voor de beoordeling zijn verschillende verdiepende onderzoeken gebruikt:

---

<sup>2</sup> In hun visie op het toekomstige hoogspanningsnet voorziet TenneT dat ze de 110kV- en 150kV-netten opsplitsen in kleine deelnetjes, die elk verbonden zijn met één 380kV- of 220kV-station. Zo is er minder transport via de lagere spanningsniveaus noodzakelijk doordat de stroom snel afgevoerd kan worden naar het 380kV- of 220kV-net.

<sup>3</sup> Het Waterstofnetwerk Nederland is niet opgenomen in investeringsplannen, maar nemen we wel mee aangezien hier wel al een uitrolplan voor ligt.

- **Startanalyse systeemintegratie.** Tijdens de NRD-fase van de Integrale Effectenanalyse pVAWOZ hebben we een startanalyse uitgevoerd voor het thema systeemintegratie. Hierin zijn eerste analyses uitgevoerd, onder meer als input voor de potentiële aanlandingen. In deze startanalyse zijn (globale) analyses gedaan naar de nationale systeemkeuzes en de optimale inpassing in de energie-infrastructuur. Hiervoor zijn verschillende scenario's onderzocht. De startanalyse systeemintegratie is een bijlage bij de NRD.
- **Integrale netdoorrekeningen TenneT en Gasunie.** TenneT en Gasunie hebben integrale netdoorrekeningen uitgevoerd om de relatieve impact te bepalen tussen verschillende locaties voor aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. Hier gaan we in paragraaf 1.3.1 verder op in.
- **Verschillen- en gevoeligheidsanalyses.** Naast de integrale netdoorrekeningen hebben we verschillen- en gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de impact van specifieke ontwikkelingen en plannen op de inpassing van wind op zee te onderzoeken.
- **Overige onderzoeken.** Er zijn buiten pVAWOZ ook verschillende onderzoeken uitgevoerd die relevant zijn voor de beoordeling van systeemintegratie. De meest relevante zijn het onderzoek Systeemintegratie 2030-2040 (Guidehouse & Berenschot, 2021), de Integrale Effectenanalyse van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) (Pondera Consult & CE Delft, 2023), de onderzoeken rondom Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN), de analyses van TenneT rondom Target Grid (TenneT, 2023) en het onderzoek naar vraagarticulatie van de industrie (Kalavasta, 2023; *Onderzoek vraagarticulatie industrie voor vawoz en programma kernenergie*, 2023). De inzichten van deze onderzoeken zijn meegenomen in dit onderzoek.

### 1.3.2 Integrale netdoorrekeningen TenneT en Gasunie

Voor het bepalen van de effecten van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur zijn integrale netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie uitgevoerd. In deze doorrekeningen wordt een inschatting gemaakt van de effecten van verschillende scenario's op het hoogspanningsnet en de landelijke waterstofinfrastructuur, in 2040.

#### **Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid**

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van de netbeheerders leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

Er zijn meerdere scenario's doorgerekend om een goede inschatting te kunnen maken van de onzekerheden en de impact van verschillende configuraties van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. De scenario's variëren op twee onderdelen:

- **Overige ontwikkelingen energiesysteem/energetisch scenario.** De ontwikkeling van de energievraag en overige productiebronnen is van belang voor de impact van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. Hoe deze ontwikkelingen gaan lopen is nog onzeker.

- **Configuraties locaties aanlanding wind op zee.** De locaties van deze aanlandingen zijn bepalend voor de impact op de energie-infrastructuur op land. Er zijn voor elektrische aanlandingen verschillende configuraties voor de (ruimtelijke) verdeling van de aanlandingen doorgerekend, deze zijn te vinden in Tabel 0-1 in Bijlage A.2. Voor waterstofaanlandingen is per locatie een analyse gedaan naar de impact van één aanlanding.

Er zijn twee energetische scenario's doorgerekend voor het zichtjaar 2040. Er is gekozen voor de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie uit de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (ii3050) (Netbeheer Nederland, 2023). Deze scenario's zijn opgesteld door Netbeheer Nederland (samenwerking van netbeheerders)<sup>4</sup>. De twee onderzochte scenario's verschillen flink van elkaar in uitgangspunten. Een uitgebreide omschrijving van de scenario's is te vinden in het scenariorapport van ii3050<sup>5</sup>.

Hieronder volgt een korte beschrijving van de twee scenario's:

- **Nationaal leiderschap.** In dit scenario wordt maximaal ingezet op elektrificatie van de energievraag, waardoor er een grote elektriciteitsvraag is. Er is naast wind op zee veel hernieuwbare opwek op land. De rol van kernenergie is beperkt. Er is relatief weinig vraag naar waterstof, door maximale inzet op elektrificatie. Wel heeft het scenario het hoogste opgesteld vermogen elektrolyse, waardoor Nederland netto exporteur van waterstof wordt.
- **Europese Integratie.** In dit scenario wordt naast elektrificatie ook ingezet op duurzame gassen voor verduurzaming, waardoor de elektriciteitsvraag lager ligt. Er wordt ingezet op veel kernenergie. In dit scenario is meer vraag naar waterstof. Daarnaast is er in dit scenario meer interconnectiecapaciteit bij het elektriciteitsnet vanwege de Europese focus.

Voor beide scenario's gaan we uit van 50 GW wind op zee met 10 elektrische verbindingen en maximaal 2 waterstofaanlandingen, zodat deze in lijn zijn met de onderzoekopgave van pVAWOZ. Voor het Europese scenario betreft dit een verhoging van het wind op zee vermogen. Verder zijn de cijfers van de ii3050 scenario's overgenomen.

Voor de elektrische verbindingen zijn voor beide energetische scenario's verschillende configuraties voor aanlanding van wind op zee doorgerekend. Het doel hiervan is om de impact van verschillende configuraties te bepalen, zodat deze tegen elkaar afgewogen kunnen worden. Idealiter worden alle mogelijke configuraties doorgerekend, maar vanuit praktisch oogpunt is het wenselijk om dit af te bakenen. Daarom zijn zes verschillende configuraties doorgerekend. Deze configuraties zijn zo opgesteld om zoveel mogelijk informatie te vergaren over de impact van verschillende configuraties op de energie-infrastructuur op land, niet om een optimale configuratie te zoeken.

Voor de waterstofverbindingen is alleen het scenario Nationaal Leiderschap doorgerekend, aangezien dit scenario het grootste vermogen elektrolyse op land heeft (en dus de grootste belasting

<sup>4</sup> Er is gebruik gemaakt van de ii3050 scenario's uit 2023. Ondertussen hebben de netbeheerders nieuwe scenario's opgesteld voor 2040, die gebruikt worden voor de nieuwe investeringsplannen. Deze nieuwe scenario's zijn een update van de scenario's uit 2023. In de bijlage B Verschillen en Gevoeligheidsanalyse gaan we in op de verschillen tussen de gehanteerde scenario's en de nieuwe scenario's van Netbeheer Nederland. Het is nog niet bekend wat de impact is van deze nieuwe scenario's op de conclusies over de effecten van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. Hier moeten de netdoorrekeningen van de netbeheerders voor hun investeringsplannen uitsluitend over geven. Die zijn op het moment van het schrijven van dit rapport nog niet uitgevoerd.

<sup>5</sup> [Rapport II3050 Scenario's.](#)

op het waterstofnetwerk). Dit is aangevuld met aanvullende informatie van Gasunie over projecten waarvoor een Expression of Interest<sup>6</sup> is afgesloten. Voor elk van de potentiële aansluitlocaties is een inschatting gemaakt van de impact als de volledige hoeveelheid elektrolyse die onderzocht wordt in pVAWOZ met één waterstofaanlanding in die regio gerealiseerd wordt.

Bijlage A bevat een uitgebreide toelichting van de uitgangspunten van de netdoorrekeningen.

### 1.3.3 Verschillen- en gevoeligheidsanalyses

De uitkomsten van de doorrekeningen van TenneT en Gasunie geven veel inzicht, maar zijn alleen geldig bij de uitgangspunten van de energetische scenario's en de gekozen aanlandconfiguraties. Er zijn echter ook ontwikkelingen denkbaar die buiten deze uitgangspunten vallen. Hiervoor zijn verschillen- en gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Bij de **verschillenanalyse** hebben we in kaart gebracht of bepaalde ontwikkelingen voldoende ondervangen zijn in de onderzochte scenario's. Als dat niet het geval is hebben we een **gevoeligheidsanalyse** gedaan om de impact hiervan op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem in kaart te brengen. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden gebruikt om de beoordeling Systeemintegratie te verrijken en daarbij meer inzicht te geven in onzekerheden en afhankelijkheden.

Op basis van gesprekken met stakeholders en interne discussies is een lijst opgesteld van ontwikkelingen waarnaar gekeken is in verschillen- en gevoeligheidsanalyse. Hieronder volgt een overzicht van de ontwikkelingen waar in deze verschillen- en gevoeligheidsanalyse gekeken wordt. Daarbij geven we ook aan op welke manier invulling gegeven wordt aan de verschillen- en gevoeligheidsanalyse. Een uitgebreide beschrijving van de methodiek en resultaten van de verschillen- en gevoeligheidsanalyses is te vinden in Bijlage B.

Tabel 1-1 Overzicht verschillen- en gevoeligheidsanalyses

Ontwikkeling	Toelichting	Wijze analyse	Toelichting
<b>Flexibiliteit en elektrolyse</b>			
Ontwikkeling flexibiliteit bij aansluitlocaties	In elk van de scenario's is een aanname gemaakt over de ontwikkeling van flexibiliteit, wat impact heeft op de inpassing voor wind op zee. Vraag is welke impact dit heeft.	Kwalitatieve beschouwing	Beschouwing op wisselwerking tussen flexibiliteit en wind op zee, en beschouwing van verschillende bronnen.
Hoeveelheid elektrolyse bij aanlandlocaties	In elk van de scenario's en aanlandconfiguraties wordt uitgegaan van ontwikkeling van elektrolyse. De vraag is wat de impact is als minder elektrolyse gerealiseerd wordt.	Kwalitatieve beschouwing	Inclusief beschouwing op aannames in scenario's.
Inzetprofiel elektrolyzers	De wijze van inzet van elektrolyzers heeft impact op de inpassing van wind op zee, en is nog onzeker.	Kwalitatieve beschouwing op basis eerder onderzoek CE Delft	
Nut en noodzaak elektrolyse bij diepe aanlanding Limburg en Brabant	Zit in doorrekening, maar in tegenstelling tot bij aanlandlocaties aan kust is het nog niet zeker of dit wel nuttig/noodzakelijk is bij diepere aanlanding.	Kwalitatieve beschouwing	Onder meer op basis van doorrekeningen. Ook beschouwing op economische afweging.

<sup>6</sup> Dit is een formeel document waarmee partijen aangeven interesse te hebben in een aansluiting op het toekomstige waterstofnetwerk.

Aansluiten elektrolyzers	Reeds inschatting gemaakt aansluitcapaciteit voor elektrolyzers bij stations. Extra duiding en richtlijnen noodzakelijk.	Extra duiding + algemene richtlijnen	
<b>Overkoepelende systeemkeuzes wind op zee</b>			
Volledige elektrische aanlanding	Onzekerheid over ontwikkeling offshore elektrolyse, wat als dit niet lukt?	Doorrekening TenneT <sup>7</sup>	Doorrekening TenneT zowel voor nationale balans vraag en aanbod (marktanalyse) en impact op elektriciteitsnet (netdoorrekening)
Minder elektrische aanlanding	Bepalen impact bij andere verhouding elektrische verbindingen en waterstof	Eigen analyses CE Delft + kwalitatieve beschouwing	Doorrekening nationale balans vraag en aanbod + kwalitatieve beschouwing effecten op elektriciteitsnet
Hybride aansluitingen	Doorrekeningen gaan uit van radiale aansluitingen, maar er wordt ook naar mogelijkheid hybride aansluitingen gekeken		
Overplanting windpark ten opzichte van kabel	Bv 3 GW WoZ aansluiten op 2 GW kabel. Minder elektriciteit richting kust, maar ook minder kosten en hogere vollastfactor kabels		
<b>Ontwikkeling energievraag industrie</b>			
Ontwikkeling CES 3.0 industrie	CES 3.0 is recent afgerond. Vraag is in hoeverre de prognoses van de CES 3.0 aansluiten bij uitgangspunten scenario's.	Eigen analyse CE Delft	Eerst een verschillenanalyse om te bepalen of er verschillen zijn met de uitgangspunten van de doorgerekende scenario's. Bij grote verschillen bepalen we kwalitatief of semi-kwantitatief de impact op de aanlanding van wind op zee.
<b>Kernenergie (alleen impact op wind op zee)</b>			
Ontwikkeling van twee of vier grote kerncentrales	Huidige onderzoeksopgave kernenergie zitten onvoldoende in huidige scenario's.	Netdoorrekening TenneT	Doorrekening verschillende locaties en configuraties.
Inzetprofiel kerncentrales	Heeft aanpassing van de inzetprofielen van kerncentrales nog impact? Overheid kan eisen voor profiel voor kerncentrales meegeven.	Kwalitatieve beschouwing	
<b>Overig</b>			
Aanlanding in Lelystad	In doorgerekende configuraties is geen aanlanding in Lelystad meegenomen.	Doorrekening TenneT	Twee variaties voor één aanlandconfiguratie, met één aanlanding in Lelystad in plaats van Middenmeer en in plaats van Eemshaven.
Zonder netuitbreiding in de Randstad	In doorrekeningen is een extra verbinding meegenomen tussen Beverwijk en Maasvlakte, maar (tijds) realisatie is onzeker.	Doorrekening TenneT	Doorrekening zonder deze extra uitbreiding uit het IP, om de impact daarvan op inpassing wind op zee in te schatten.
Minder vollasturen wind op zee	De windparken op zee die gerealiseerd moeten worden in de periode 2031-2040 liggen verder uit de kust dan de windparken die nu gerealiseerd worden. Dit kan effect hebben op de vollasturen van de windparken op zee.	Kwalitatieve beschouwing	Kwalitatieve beschouwing op mogelijke ontwikkeling vollasturen en impact op inpassing wind op zee.
Target Grid	Er is de wens om inzicht te krijgen in de effecten van de toekomstbeelden van Target Grid op de aanlanding van wind op zee.	Kwalitatieve beschouwing door CE en TenneT	Kwalitatieve omschrijving van status Target Grid en hoe deze plannen meegenomen zijn, en mogelijke impact op aanlanding.
Nieuwe scenario's Netbeheer Nederland	De analyses voor Systeemintegratie zijn gebaseerd op de ii3050 scenario's uit 2023. Ondertussen zijn door netbeheerders nieuwe scenario's opgesteld voor 2040, voor de nieuwe investeringsplannen.	Vergelijking aannames	Op dit moment niet mogelijk om conclusies te trekken over impact op conclusies over inpassing wind op zee, omdat regionalisatie nieuwe scenario's en netdoorrekening nog niet zijn uitgevoerd.

<sup>7</sup> Deze doorrekening zijn gedaan met een ouder model van TenneT, in een eerdere onderzoeksrunde. Voor de basisscenario's en de overige gevoeligheidsanalyses zijn nieuwe doorrekeningen gedaan met een nieuw model, maar niet voor de gevoeligheidsanalyse *Volledige elektrische aanlanding*.

### 1.3.4 Toekomstvastheid

Bij de het onderdeel Systeemintegratie beoordelen we de impact van aanlanding van wind op zee op het energiesysteem voor het jaar 2040, het eindpunt van de zichtperiode van pVAWOZ. Echter, de tijdscomponent is ook cruciaal bij de uitrol van wind op zee. Daarbij is zowel de uitrol gedurende de zichtperiode van pVAWOZ (2031-2040) van belang als de doorkijk na 2040. Deze tijdscomponent wordt beoordeeld in het rapport Toekomstvastheid (bijlage G). Systeemintegratie is hierbij ook een belangrijke factor.

Om een compleet beeld te schetsen van alle relevante aspecten rondom Systeemintegratie geven we in dit hoofdstuk een overzicht van de relevante inzichten voor Systeemintegratie met betrekking tot toekomstvastheid. Dit wordt behandeld in hoofdstuk 13. Deze inzichten zijn ook te vinden in het rapport Toekomstvastheid (bijlage G), waar een totaalbeeld rondom het tijdspad geschetst wordt (breder dan alleen systeemintegratie).

## 1.4 Welke potentiële aanlandingen worden beoordeeld?

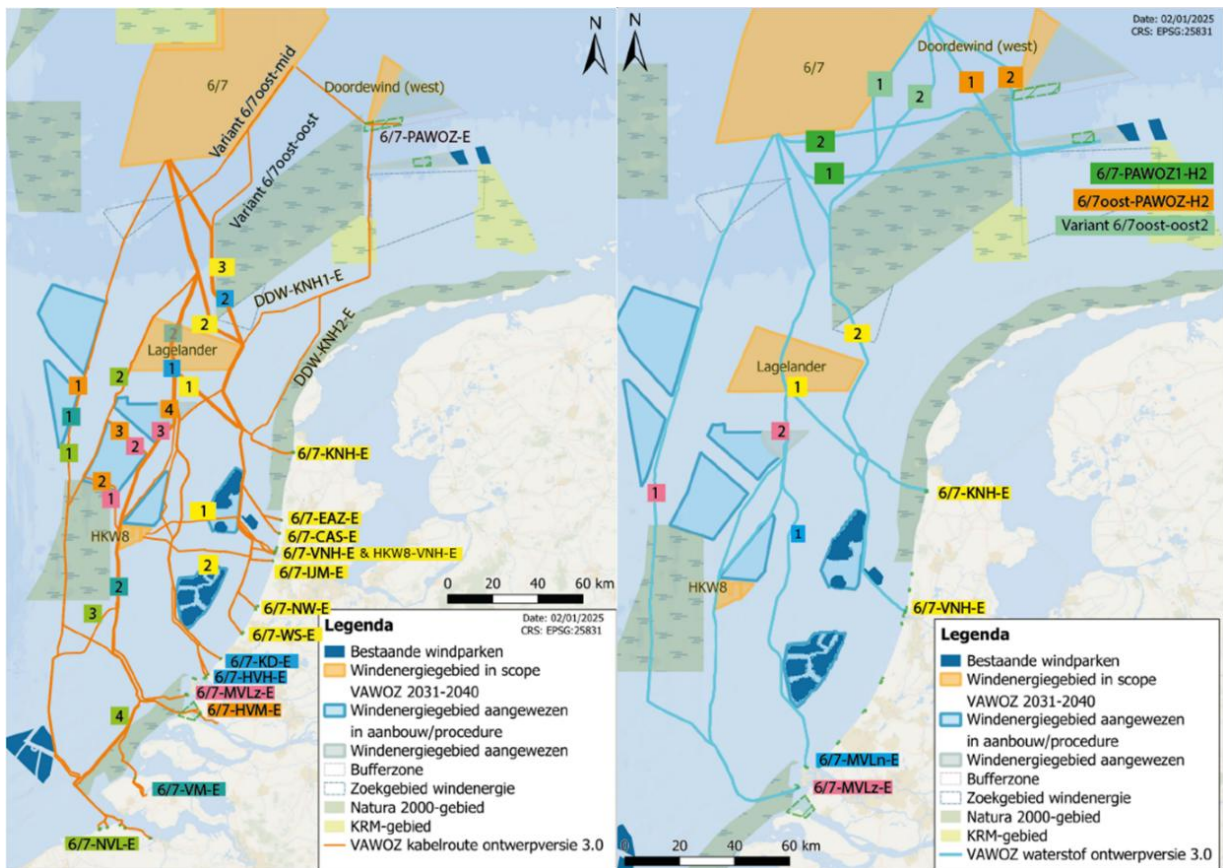
Binnen het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grofweg tien elektrische en één of twee waterstofverbindingen. Verdeling van de verbindingen vanuit de windenergiegebieden is als volgt:

- Zoekgebied 6/7: diverse elektrische verbindingen en één of twee waterstofverbindingen, onder meer afhankelijk van de aanwijzing van windenergiegebieden in gebied 6/7 en waterstofontwikkelingen.
- HKW8 (Hollandse Kust West 8): één elektrische verbinding.
- Doordewind (west): één elektrische verbinding.

Bij de elektrische verbindingen gaat het om verbindingen van 2 GW, met uitzondering van de verbinding vanuit HKW8 (700 MW). Gezien de transportcapaciteit van de waterstofleidingen (afhankelijk van druk en diameter, bandbreedte 10-25 GW<sub>H2</sub> per leiding), wordt voor de routes van waterstofleidingen alleen gekeken naar zoekgebied 6/7. Eventueel is het mogelijk om vanuit andere windenergiegebieden op de leidingen aan te takken en waterstof te importeren vanuit andere landen door in te takken op de leiding. Daarnaast wordt in een separaat onderzoek gekeken naar de optie voor hergebruik van bestaande buisleidingen.

Voor de regio Noordzee zijn de te onderzoeken routes ontworpen vanuit de windenergiegebieden naar de verschillende aanlandingszones en naar het demarcatiepunt met het programma PAWOZ-Eemshaven. De kaarten in Figuur 1-1 geven het overzicht van de potentiële alternatieven voor elektrische (links) en de waterstofroutes (rechts) op de Noordzee.

De routes voor de regio Noordzee lopen tot aan de aanlandingszone aan de kust. Vervolgens lopen deze routes op land ondergronds tot aan de aansluitlocatie. Per regio zijn routes ontworpen vanaf de aanlandingszone aan de kust tot de aansluitlocatie op land. Deze worden beschreven in de individuele hoofdstukken per regio (hoofdstuk 6 tot en met 11).



Figuur 1-1 Routes voor elektriciteit (links) en waterstof (rechts) regio Noordzee

## 1.5 Leeswijzer

Dit rapport bevat de effectbeoordeling systeemintegratie en is een bijlage van de Integrale Effectenanalyse van het Programma VAWOZ 2031-2040. Het hoofdrapport van de Integrale Effectenanalyse bevat de belangrijkste bevindingen en conclusies van dit rapport.

Dit rapport bevat de volgende hoofdstukken:

- **Hoofdstuk 2** bevat een omschrijving van het bredere perspectief van systeemintegratie van wind op zee, de keuzes die daarvoor van belang zijn en de afwegingen die daarbij spelen.
- **Hoofdstuk 3** bevat een omschrijving van het beoordelingskader voor systeemintegratie.
- **Hoofdstuk 4** bevat de regio-overstijgende resultaten.
- **Hoofdstuk 5** bevat de resultaten van de gevoeligheidsanalyses.
- **Hoofdstukken 6 tot en met 11** bevatten de effectbeoordelingen voor systeemintegratie, per regio.
- **Hoofdstuk 12** bevat de conclusies voor Systeemintegratie.
- **Hoofdstuk 13** bevat de inzichten van Systeemintegratie voor het tijdspad (Toekomstvastheid).

Daarnaast bevat het rapport bijlagen met een omschrijving van de aanpak van de integrale netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie (Bijlage A). Bijlage B bevat de uitgebreide resultaten van de verschillen- en gevoeligheidsanalyses.

## 2 Breder perspectief systeemintegratie wind op zee

In pVAWOZ, en ook bij het thema Systeemintegratie, wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee onderzocht. Het realiseren van maximaal 50 GW wind op zee in 2040 is het uitgangspunt van het onderzoek, maar de ontwikkelingen in de komende jaren moeten bepalen hoeveel wind op zee gerealiseerd kan worden en noodzakelijk is. Een efficiënte inpassing van deze grote vermogens aan windparken op zee in het energiesysteem is een uitdaging en hierbij zijn verschillende aspecten van belang.

In dit hoofdstuk schetsen we een breder perspectief over systeemintegratie van wind op zee.

### 2.1 Wat zijn belangrijke aspecten voor de systeemintegratie van wind op zee?

Onder systeemintegratie verstaan we de inpassing van wind op zee in het energiesysteem. Het gaat specifiek om de technische en energetische inpassing. Zaken zoals kosten, ruimte en milieu zijn belangrijk voor een maatschappelijk optimale inpassing van wind op zee, maar vallen niet onder systeemintegratie. Deze thema's worden apart onderzocht.

Maar alsnog heeft systeemintegratie een brede definitie. Daarom maken we verder onderscheid naar de verschillende aspecten die bij de inpassing van wind op zee in het energiesysteem van belang zijn. Grofweg zijn er drie aspecten van belang bij systeemintegratie van wind op zee:

- **Nationale systeemkeuzes voor wind op zee.** Dit gaat over de vormgeving van het totale energiesysteem en inpassing van wind op zee hierin. Relevante systeemkeuzes zijn:
  - *Benutting windenergie.* Er kunnen grote hoeveelheden elektriciteit geproduceerd worden met windparken op zee. De keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040.
  - *Systeemontwerp Noordzee.* Er zijn verschillende keuzes die gemaakt moeten worden over het systeemontwerp voor de Noordzee. Deze keuzes worden gemaakt in het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN). In dit onderzoek bespreken we de belangrijkste keuzes en afwegingen.
- **Optimale inpassing energie-infrastructuur.** De energie van windparken op zee moet naar land getransporteerd worden en daar vervolgens met de infrastructuur op land doorgevoerd worden richting eindgebruikers. Dit geldt zowel voor elektrische aansluitingen als waterstofverbindingen. De windenergie kan op verschillende aansluitlocaties aangesloten worden op de energie-infrastructuur op land. Een efficiënte verdeling van wind op zee over de verschillende aanlandlocaties is noodzakelijk om de impact op de energie-infrastructuur op land te minimaliseren.
- **Samenhang met overige ontwikkelingen energiesysteem.** Bij beide aspecten is de samenhang met overige ontwikkelingen van het energiesysteem van belang. De ontwikkeling van de energievraag, overige productiebronnen, flexibele bronnen en ontwikkelingen in het buitenland hebben impact op hoe wind op zee optimaal ingepast kan worden. In paragraaf 2.4 gaan we in op deze samenhang en de impact van de ontwikkeling van overige onderdelen van het energiesysteem op de inpassing van wind op zee.

Binnen de beoordeling systeemintegratie van het Programma VAWOZ 2031-2040 ligt de focus op het tweede aspect, de optimale inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur. Hiervoor

bespreken we in paragraaf 2.3 de belangrijkste afwegingen. In de effectbeoordeling systeemintegratie (hoofdstuk 6 tot en met 11) bespreken we hoe dit uitwerkt voor de verschillende aanlandingen in de verschillende regio's.

De nationale systeemkeuzes worden in andere beleidsdocumenten, zoals het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN), het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) onderzocht. Echter, de nationale systeemkeuzes hebben ook impact op de inpassing in de energie-infrastructureur. Daarom gaan we in paragraaf 2.2 wel in op de belangrijkste afwegingen en inzichten rondom de nationale systeemkeuzes.

## 2.2 Nationale systeemkeuzes

### 2.2.1 Benutting wind op zee: efficiënte hoeveelheid wind op zee en verhouding E/H<sub>2</sub>

In pVAWOZ wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee in 2040, met maximaal 10 elektrische verbindingen en één of twee waterstofverbindingen in de periode 2031-2040, onderzocht. Het realiseren van maximaal 50 GW wind op zee in 2040 is het uitgangspunt van het onderzoek, maar de ontwikkelingen in de komende jaren moeten bepalen hoeveel wind op zee gerealiseerd kan worden en noodzakelijk is.

De windparken uit de huidige routekaart windenergie op zee 21 GW worden met kabels aangesloten op het elektriciteitssysteem op land en de geproduceerde energie wordt dus als elektriciteit naar land gebracht en (grotendeels) als elektriciteit benut. Maar bij realisatie van 50 GW wind op zee is de productie van windparken op zee volgens de huidige prognoses/scenario's groter dan de toekomstige binnenlandse (directe) elektriciteitsvraag. Er zijn verschillende mogelijkheden om de overige elektriciteit uit de windparken op zee nuttig aan te wenden. De belangrijkste opties zijn elektriciteit omzetten naar waterstof met elektrolyzers op land of op zee en/of elektriciteit doorvoeren richting het buitenland.

De keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040 en welk deel van de windenergie idealiter als elektriciteit naar land gebracht wordt en welk deel op zee omgezet wordt naar waterstof. De belangrijkste factoren hierbij zijn:

- **Ontwikkeling energievraag.** Voor het behalen van de klimaatdoelen is elektrificatie noodzakelijk, wat leidt tot een forse toename van de vraag naar elektriciteit en waterstof. Het gaat hierbij ook om flexibele energievraag, bijvoorbeeld van elektrolyzers en power-to-heat (meer hierover in paragraaf 2.4.1).  
De ontwikkeling van de energievraag is op twee manieren cruciaal voor de uitrol van wind op zee. Extra ontwikkeling van met name elektriciteitsvraag is noodzakelijk om wind op zee te kunnen inpassen in de energie-infrastructureur op land (**haalbaarheid**). Als de elektrificatie achterblijft is er ook onvoldoende afzetmarkt voor de windparken op zee en is minder wind op zee noodzakelijk (**doel**).  
Bij de vraagontwikkeling is, met name voor waterstof, ook van belang dat er vraag is naar binnenlandse productie van deze energiedragers en dat dit kan concurreren met import.
- **Verhouding tot het buitenland en zelfvoorzienendheid.** Hierbij zijn twee aspecten van belang: wil Nederland zoveel mogelijk energie zelf produceren en kan dit ook concurreren met import (met name relevant voor waterstof) en wil Nederland ook energie produceren voor export (met

name relevant voor elektriciteit). Dit bepaalt, naast de binnenlandse vraag, hoe groot de behoefte is aan productie van energie in Nederland.

- **Ontwikkeling overige productiebronnen.** Overige productiebronnen, zoals hernieuwbare opwek op land en kernenergie, vullen ook een deel van de binnenlandse energievraag in. Dit bepaalt ook hoeveel vraag er nog is voor elektriciteit van windparken op zee.
- **Maatschappelijke kosten.** De vraag naar elektriciteit en waterstof, het aanbod van andere bronnen (zoals opwek op land en kernenergie) en de kosten voor energie-infrastructuur op zee bepalen welke verhouding tussen elektrische aanlanding en waterstofaanlanding tot de laagste maatschappelijke kosten leidt. Voor de maatschappelijke kosten zijn onder meer energie-efficiëntie, de kosten van de energie-infrastructuur en de kosten van productie relevant.
- **Effecten milieu en ruimte.** Er zit een verschil in de ruimtelijke en milieu impact, en de ruimtelijke mogelijkheden, van elektrische verbindingen en waterstofverbindingen. Dit kan ook een afweging zijn om voor een andere verhouding te kiezen. Daarnaast kunnen ruimtelijk en milieutechnische beperkingen ertoe leiden dat bepaalde routes voor elektrische verbindingen of waterstofverbindingen niet (tijdig) gerealiseerd kunnen worden. Meer over de effecten van de aanlandingen op milieu en ruimte is te vinden in de beoordeling *Milieu en Ruimte*.
- **Tijdige realisatie.** Realisatie van maximaal 50 GW wind op zee in 2040, het uitgangspunt van het onderzoek, is erg ambitieus en vereist een hoog tempo voor de uitrol van de windparken op zee en de energie-infrastructuur op zee, energie-infrastructuur op land en de ontwikkeling van de energievraag.

## 2.2.2 Systeemontwerp Noordzee

Er zijn verschillende keuzes die gemaakt moeten worden over het systeemontwerp voor de Noordzee. Deze keuzes worden gemaakt in het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN). In dit onderzoek bespreken we de belangrijkste keuzes en afwegingen

Windenergie die opgewekt wordt op de Noordzee kan op verschillende manieren richting land getransporteerd worden. Bij de huidige routekaart windenergie op zee 21 GW is het systeem op de Noordzee nog redelijk overzichtelijk en worden de offshore windparken met een platform en elektrische kabels aangesloten op een hoogspanningsstation op land (via een convertorstation bij HVDC). In Nederland worden de windparken op zee die nu gerealiseerd zijn, en die nog relatief dicht bij de kust liggen, aangesloten met gestandaardiseerde 700 MW HVAC-offshore netaansluitingen. Naarmate de windparken verder weg liggen wordt de omslag gemaakt naar gestandaardiseerde 2 GW HVDC-platforms. IJmuiden Ver Alpha, Beta en Gamma worden de eerste windparken op zee die TenneT via HVDC-platforms aansluit. Bij de verbindingen voor windparken op zee waar in pVAWOZ naar gekeken wordt gaat het vooral om 2 GW HVDC-kabels. Bij een enkele verbinding (richting Velsen vanaf HKW8) gaat het om een 700 MW HVAC-kabel.

In de bovenstaande situatie is er, zowel bij een 700 MW HVAC- als een 2 GW HVDC-aansluiting, één directe verbinding vanaf een windpark naar een hoogspanningsstation op land. Dit worden **radiale aansluitingen** genoemd. Ook voor aanlanding van waterstof zijn radiale aansluitingen mogelijk. In dat geval wordt elektrolyse direct bij een windpark op zee toegepast en wordt de geproduceerde waterstof via een buisleiding naar land gebracht. Richting 2040 zijn er ook andere opties voor het aanlanden van de windenergie, namelijk hybride aansluitingen en overplanting. Hieronder gaan we in op de effecten hiervan op de nationale energiebalans.

### Hybride aansluitingen (ook wel energie-hubs of hub-and-spoke)

In de verdere toekomst is het mogelijk dat meerdere kabels samenkomen bij een energiehub, waar vervolgens elektrolyse toegepast wordt. Daarna wordt vanaf deze energiehub elektriciteit en waterstof richting de kust getransporteerd. Dit worden **hybride aansluiting**<sup>8</sup> genoemd. Door het realiseren van een energiehub vindt systeemintegratie op zee plaats en kan op zee de conversie van elektriciteit naar waterstof al geoptimaliseerd worden waardoor de elektrische aansluitingen een hogere benuttingsgraad hebben.

Door toepassing van hybride aansluitingen hoeft de elektrolyser op zee niet het productieprofiel van het windpark op zee te volgen, maar kan deze ingezet worden op basis van marktprijzen en de vraag naar elektriciteit op land. Op momenten met veel wind op zee is de additionele hoeveelheid flexibiliteit beperkt, aangezien dan zowel de elektrische aansluitingen als de waterstofaanlanding maximaal benut moet worden. Maar op momenten met relatief weinig wind op zee bieden hybride aansluitingen extra flexibiliteit doordat meer stroom naar land getransporteerd kan worden.

Dit heeft twee potentiële effecten:

1. Op momenten met relatief weinig wind (bijvoorbeeld 20% van de productie) en weinig zon kan meer elektriciteit richting land getransporteerd worden. Op die momenten is er vraag naar meer elektriciteit op land en zijn de elektriciteitsprijzen relatief hoog. Bij radiale aansluitingen van 10 GW elektriciteit en 9 GW offshore elektrolyse met waterstofaanlanding zou in dit geval slechts 2 GW (20% van 10 GW) elektriciteit naar land getransporteerd kunnen worden. Bij hybride aansluitingen, met dezelfde vermogens, kan op zo'n moment 3,8 GW elektriciteit naar land getransporteerd worden (20% van 19 GW). Hierdoor kan meer energie van windparken op zee direct gebruikt worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag. Daardoor zijn er minder tekorten van elektriciteit, die anders met dure stroom (zoals waterstofcentrales of eventueel import) ingevuld zou moeten worden.
2. Op momenten met relatief weinig wind, maar weinig elektriciteitsvraag op land (of bijvoorbeeld veel productie van zonnepanelen) en lage prijzen, kan er ook gekozen worden om minder elektriciteit naar land te brengen en meer waterstof te produceren op zee. De maatschappelijke meerwaarde hiervan is minder groot, aangezien het om overschotten van elektriciteit die dan niet op land maar op zee benut worden. Wel is hierdoor minder transport van elektriciteit nodig, waardoor wat transportverliezen uitgespaard kunnen worden (er is wel waterstoftransport nodig, maar dat heeft minder verliezen).

#### **Analyse op basis van scenario, geen absolute waarheid**

De onderstaande analyses zijn uitgevoerd voor het scenario Nationaal Leiderschap 2040. Dit scenario geeft een inschatting van de mogelijke ontwikkeling van het energiesysteem en de analyses geven daarmee een indicatie van de benutting van wind op zee in 2040, maar dit is geen absolute waarheid. Het is mogelijk dat de daadwerkelijke ontwikkelingen afwijken. Bij andere ontwikkelingen van vraag en de overige opwek zullen onderstaande resultaten anders uitvallen. In dit geval zullen de algemene conclusies over hybride aansluitingen naar verwachting echter niet anders uitvallen.

Uit doorrekeningen met hybride aansluitingen volgt dat er door toepassing van hybride aansluitingen 3 TWh extra elektriciteit naar land gebracht wordt, wat overeenkomt met ongeveer 3% van de totale productie van de windparken die op de hybride aansluitingen zijn aangesloten. Hierdoor zijn er 3 TWh minder tekorten aan elektriciteit op land (14 TWh in plaats van 17 TWh). Het tweede potentiële effect, minder transport van elektriciteit op momenten met overschotten, vindt nauwelijks plaats.

<sup>8</sup> Er wordt ook wel van hybride aansluitingen gesproken bij de combinatie tussen een elektrische verbinding vanaf een windpark richting de kust in combinatie met een interconnector. In dit onderzoek hebben we het bij hybride aansluitingen echter over de combinatie van elektrische verbindingen en waterstofverbindingen.

De meerwaarde van hybride aansluitingen zit er dus in dat meer geproduceerde elektriciteit van windparken op zee direct benut kan worden als elektriciteit. Daardoor zijn er naar verwachting ook minder elektrische verbindingen richting land nodig (NSWPH, 2024). Dat kan leiden tot lagere systeemkosten. Echter, hybride aansluitingen zullen naar verwachting ook hogere kosten hebben in vergelijking tot radiale aansluitingen. Voor de afweging tussen hybride aansluitingen en radiale aansluitingen is een analyse op de impact van de totale systeemkosten noodzakelijk. Uit analyses uit de Pathway Study 2.0 van NSWPH volgt dat toepassing van hybride aansluitingen op de Noordzee naar verwachting leidt tot lagere totale systeemkosten in heel Noordwest-Europa (NSWPH, 2024). Er zijn hierin geen specifieke analyses voor Nederland gedaan.

Er zijn nog andere concepten voor hubs op zee denkbaar, bijvoorbeeld ook voor uitwisseling met het buitenland en andere energiehubs. Ook deze ontwikkelingen kunnen impact hebben op het transport van elektriciteit via verbindingen naar land. Multi-Purpose Interconnectoren<sup>9</sup> kunnen er voor zorgen dat een deel van de stroom niet naar land getransporteerd hoeft te worden op momenten met veel productie van de windparken op zee.

### **Overplanting: meer windmolens aansluiten op hetzelfde aantal kabels**

Momenteel wordt bijna het volledige vermogen van windparken op zee ontsloten met elektriciteitskabels naar land<sup>10</sup>. De elektriciteitsinfrastructuur op zee is echter erg kostbaar, zeker voor de grotere afstanden bij de windparken op zee waar in pVAWOZ naar gekeken wordt. Daarom kan overwogen worden om overplanting toe te passen, waarbij een groter windvermogen aangesloten wordt op een kabel. Zo zijn minder kabels nodig en krijgen de kabels een grotere benuttingsgraad. Op uren met veel wind op de Noordzee kan dan echter wel minder stroom naar land worden gebracht dan met kabels die gedimensioneerd zijn op de piekvermogens. Op uren met relatief weinig wind kan wel eenzelfde hoeveelheid wind naar land gebracht worden.

Overplanting toepassen, en een groter vermogen windmolens per kabel aansluiten, kan een mogelijkheid zijn vanwege de hoge kosten voor elektriciteitsinfrastructuur op zee. We hebben analyses uitgevoerd naar overplanting bij het uitgangspunt van maximaal 50 GW wind op zee in 2040, met 20 GW elektrische aanlanding en 9 GW waterstofaanlanding na realisatie van de routekaart windenergie op zee 21 GW. We hebben we een scenario onderzocht waarbij de 20 GW wind op zee elektrisch ontsloten wordt met 14 GW aan kabels (7 verbindingen à 2 GW). Dit is een extreme mate van overplanting, om de effecten goed zichtbaar te maken<sup>11</sup>.

Deze analyse laten zien dat:

- Bij deze mate van overplanting wordt ongeveer 50% van de productie van het extra vermogen aan windmolens (ten opzichte van de aansluitcapaciteit) weggegooid. Dit gebeurt op momenten met veel wind.
- Het realiseren van 7 elektrische verbindingen à 2 GW in plaats van 10 (bij 20 GW windparken op zee) zorgt ervoor dat ruim 12 TWh minder elektriciteit naar land gebracht wordt. Dit gaat bijna alleen ten koste van de overschotten op land zijn, niet van het directe gebruik van elektriciteit. Dit betekent dat het bij overplanting primair gaat over een afweging of de waarde van

<sup>9</sup> Dit zijn kabels die twee landen verbinden via een windpark op zee, waardoor het tegelijkertijd de functie van interconnector en elektrische aanlanding van het windpark op zee vervult.

<sup>10</sup> Er vindt momenteel wel een kleine mate van overplanting plaats, maar een stuk minder dan in de uitgevoerde analyses.

<sup>11</sup> Een minder extreme mate van overplanting zal in de praktijk naar verwachting wenselijk zijn, ook voor de ontwikkelaars van de windparken op zee. Verder onderzoek is noodzakelijk voor het bepalen van een efficiënte mate van overplanting.

overschotten op land (die benut kunnen worden met bijvoorbeeld elektrolyse, power-to-heat en export) opweegt tegen de kosten van het realiseren van meer kabels naar land.

#### **Analyse op basis van scenario, geen absolute waarheid**

De onderstaande analyses zijn uitgevoerd voor het scenario Nationaal Leiderschap 2040. Dit scenario geeft een inschatting van de mogelijke ontwikkeling van het energiesysteem en de analyses geven daarmee een indicatie van de benutting van wind op zee in 2040, maar dit is geen absolute waarheid. Het is mogelijk dat de daadwerkelijke ontwikkelingen afwijken. Bij andere ontwikkelingen van vraag en de overige opwek zullen onderstaande resultaten anders uitvallen.

De resultaten van bovenstaande analyse laten zien dat het nuttig is om de optie van overplanting verder te onderzoeken, aangezien de kosten voor energie-infrastructuur op zee verminderd kunnen worden en het directe gebruik van elektriciteit nauwelijks afneemt. Daarbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat er door het weggooien van elektriciteit minder overschotten zijn. En de overschotten op land hebben ook waarde, omdat deze bijvoorbeeld benut kunnen worden door bijvoorbeeld elektrolyzers op land. Daardoor kan dit ertoe leiden dat minder elektrolyse op land mogelijk waardoor meer andere bronnen van waterstof, zoals import, nodig om aan de vraag naar (groene) waterstof te voorzien

Voor een maatschappelijk optimale keuze dienen al deze opties tegen elkaar afgewogen te worden. Daarbij dient niet alleen naar de energetische effecten gekeken te worden, zoals in onze analyse, maar ook naar andere aspecten zoals kosten, ruimtelijke effecten, milieueffecten, ecologische effecten en uitvoerbaarheid. Daarnaast moet ook onderzocht worden wat de impact van deze concepten op de business case voor ontwikkelaars van de windparken is, aangezien deze zal verslechteren bij toepassing van overplanting.

Deels komen de uitkomsten van de analyses naar overplanting voort uit het feit dat er, ten opzichte van de vraag, al van veel opwek uit wordt gegaan. In plaats van het aansluiten van extra windmolens op dezelfde kabels, of dezelfde hoeveelheid wind op zee op minder kabels, kan het ook efficiënt zijn om überhaupt minder windmolens op zee elektrisch te ontsluiten (bijvoorbeeld 14 GW wind op zee op 14 GW kabels).

#### **Impact op inpassing wind op zee in energie-infrastructuur op land**

Beide bovenstaande systeemkeuzes (hybride aansluitingen en overplanting) hebben ook impact op de inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur op land. We verwachten dat beide systeemkeuzes er in het algemeen voor zullen zorgen dat wind op zee makkelijker ingepast kan worden, aangezien het effect op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast kan worden beperkt is en er in totaal minder elektrische verbindingen nodig zijn. Zo kan mogelijk een groter vermogen aan windmolens ingepast worden, zonder forse uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur. In paragraaf 5.1.2 en bijlage B Verschillen- en Gevoeligheidsanalyse van dit rapport gaan we hier uitgebreid op in.

### **2.3 Optimale inpassing energie-infrastructuur**

Hieronder bespreken we de belangrijkste afwegingen bij inpassing van elektrische aanlandingen en waterstofaanlandingen in de energie-infrastructuur. Dit is ook het aspect waar bij deze beoordeling Systeemintegratie de focus op ligt. In deze paragraaf bespreken we in algemene zin de belangrijkste afwegingen. In alle daaropvolgende hoofdstukken werken we dit in meer detail uit.

### 2.3.1 Afwegingen elektrische aanlandingen

De kabels vanaf windparken op zee moeten aangesloten worden op het hoogspanningsnet op land bij hoogspanningsstations. Hier is **aansluitcapaciteit** voor nodig. Indien een station vol is en niet kan worden uitgebreid, moet een nieuw station gerealiseerd worden voor extra aansluitingen van wind op zee en voor mogelijke flexibiliteitsbronnen. In principe is er vanuit het energiesysteem geen beperking op het aantal stations dat gerealiseerd kan worden op aansluitlocaties en dus op de maximale aansluitcapaciteit. Maar er moet wel voldoende ruimte beschikbaar zijn voor een nieuw station en de aanleg van een nieuw station kost veel tijd (7-10 jaar). Daarnaast moeten nieuwe stations aangekoppeld worden met bovengrondse verbindingen, wat ook een grote ruimtelijke impact heeft.

Daarnaast moet de elektriciteit vanaf de aansluitlocaties getransporteerd worden richting de eindgebruikers. Bij de beoordeling systeemintegratie wordt onderzocht welke verdeling van wind op zee over verschillende aanlandlocaties zorgt voor een minimale impact op de hoogspanningsverbindingen (HS-verbindingen) op land. Hierbij zijn de volgende zaken van belang:

- **Elektrische aanlanding vanuit routekaart windenergie op zee 21 GW.** Op verschillende aansluitlocaties wordt al elektrische aanlanding gerealiseerd vanuit de bestaande routekaart. Dit heeft impact op de hoeveelheid elektrische aanlanding die daarna nog mogelijk is.
- **Directe benutting elektriciteit bij aansluitlocatie**, met name vanuit de industrie. Hoe meer elektriciteit direct benut kan worden, hoe minder afgevoerd hoeft te worden met de HS-verbindingen. Hierbij is zowel de omvang van de elektriciteitsvraag en productie als de (on)gelijktijdigheid van belang.
- **Inzet flexibiliteit op aansluitlocatie** voor het benutten van overschotten van elektriciteit. Indien deze overschotten op de aansluitlocatie zelf genut worden, met bijvoorbeeld elektrolyzers, vraagsturing of batterijen, dan hoeft minder elektriciteit afgevoerd te worden met de HS-verbindingen.
- **Productie overige elektriciteitsbronnen bij aansluitlocatie.** Forse productie van andere (niet regelbare) bronnen, zoals kernenergie of hernieuwbare opwek op land, in de nabijheid van de aansluitlocatie heeft impact op de lokale overschotten aan elektriciteit die ontstaan en daarmee op de benodigde afvoer van elektriciteit via de HS-verbindingen
- **Locatie aansluitlocatie.** De effecten van aanlanding van wind op zee op de HS-verbindingen zijn anders bij de aansluitlocaties in het binnenland dan bij de aansluitlocaties aan de kust.
- **Transportcapaciteit hoogspanningsverbindingen (huidig en gepland).** Hoe meer capaciteit de HS-verbindingen bij een aansluitlocatie hebben, hoe meer elektriciteit kan worden afgevoerd zonder dat nieuwe uitbreidingen noodzakelijk zijn.
- **Ingrepen bij knelpunten aan hoogspanningsverbindingen.** Indien de capaciteit van de hoogspanningsverbindingen onvoldoende is op bepaalde momenten, dan zijn ingrepen nodig. Beperkte overschrijding van de capaciteit (in omvang en tijd) kan opgelost worden met redispatch<sup>12</sup>, maar bij grote overschrijdingen zijn grote ingrepen nodig zoals netverzwaring. Systeemoplossingen of marktgrepen kunnen dan ook een potentiële oplossing zijn. In hoofdstuk 3.4 gaan we hier in meer detail op in.

---

<sup>12</sup> 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. We gaan uit van een technische grens van maximaal 0,5 TWh/jaar (economisch gezien is bij een lagere grens verzwaring al voordeliger). Dit is nadrukkelijk een vuistregel; de daadwerkelijke redispatch-mogelijkheden zullen per locatie verschillen en zijn sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van regelbaar vermogen op de juiste locaties in het net.

### 2.3.2 Afwegingen waterstofaanlandingen

Om de geproduceerde waterstof bij de afnemers op land te krijgen, moet de waterstof aan land ingevoerd worden op het Waterstofnetwerk Nederland. Daarnaast zijn transportleidingen op zee en aanvoerleidingen vanaf de aansluitlocaties richting het Waterstofnetwerk Nederland noodzakelijk. Idealiter zijn zo min mogelijk nieuwe waterstofleidingen noodzakelijk.

Bij waterstofaanlandingen zijn met name de volgende zaken van belang:

- **Afstand vanaf offshore elektrolyser tot aanlandzone.** Bij de aanlanding van windenergie in de vorm van waterstof is de afstand van de benodigde buisleiding over zee van belang. Hoe korter de afstand tussen de elektrolyser op zee en de aanlandzone, hoe korter de afstand van de benodigde buisleiding. Binnen pVAWOZ wordt de rand van windgebied 6/7 als uitgangspunt genomen, en niet de locatie van de offshore elektrolyser (mede omdat deze nog niet bekend is).
- **Afstand van aanlandzone tot Waterstofnetwerk Nederland.** Hoe dichter de aanlandingszone bij Waterstof netwerk Nederland ligt, hoe minder afstand overbrugd hoeft te worden met aanvoerleidingen.
- **Capaciteit Waterstofnetwerk Nederland.** De waterstof moet vanaf de aansluitlocaties op het landelijke waterstofnetwerk via het landelijke waterstofnetwerk getransporteerd worden richting afnemers en opslaglocaties. Het landelijk netwerk moet voldoende capaciteit hebben om deze transportstromen te faciliteren.
- **Import waterstof.** In sommige regio's die overwogen worden voor waterstofaanlanding wordt ook grootschalige import van waterstof (of waterstofdragers) voorzien. Deze waterstof zal via dezelfde buisleidingen van het Waterstofnetwerk Nederland getransporteerd worden, waardoor deze meer capaciteit nodig hebben.
- **Elektrolyse op land.** De regio's die overwogen worden voor waterstofaanlanding worden ook overwogen voor elektrische aanlanding. Op een deel van deze aansluitlocaties zullen naar verwachting grootschalige elektrolyzers gerealiseerd worden. De geproduceerde waterstof van deze elektrolyzers op land moeten via dezelfde buisleidingen van het Waterstofnetwerk Nederland getransporteerd worden, waardoor deze meer capaciteit nodig hebben.
- **Mogelijkheid gebruik bestaande aardgasleidingen op land.** Idealiter worden bestaande aardgasleidingen voor transport van waterstof op land, zowel voor het nationale transportnetwerk als voor aftakkingen. Of bestaande aardgasleidingen gebruikt kunnen worden hangt af van de technische staat van de aardgasleidingen, de capaciteit van deze leiding (is dit voldoende voor de benodigde transportvolumes) en het al dan niet tijdig beschikbaar komen van de leiding (wanneer is deze niet meer nodig voor aardgastransport). Er moet een nieuwe leidingen gerealiseerd worden, indien geen bestaande aardgasleiding gebruikt kan worden. Bij het geplande Waterstofnetwerk Nederland (WNL) worden deels bestaande aardgasleidingen omgezet naar waterstofleidingen en worden op sommige punten nieuwe leidingen gerealiseerd.
- **Mogelijkheid gebruik bestaande aardgasleidingen op zee.** Bij de aanlanding van windenergie in de vorm van waterstof speelt daarnaast ook nog de afweging in hoeverre bestaande buisleidingen op zee gebruikt kunnen worden voor het transport van waterstof tot de kust. In deze effectbeoordeling kijken we niet naar hergebruik van aardgasleidingen op zee, alleen naar nieuwe buisleidingen. Er loopt een separaat onderzoek naar de mogelijkheid voor het hergebruik van bestaande leidingen op zee.
- **Waterstofopslag.** Bij productie van waterstof op zee met offshore elektrolyzers zal ook waterstofopslag noodzakelijk zijn om vraag en aanbod van waterstof in balans te brengen. Dit kan ook een relevante factor zijn bij de afweging tussen locaties, als bepaalde regio's eerder aan

een waterstofopslagfaciliteit zijn gekoppeld dan andere regio's. Na realisatie van het WNL is er een landelijk dekkend netwerk en zijn alle regio's gekoppeld aan de waterstofopslagfaciliteiten, dus dan is dit naar verwachting geen belangrijk aspect meer in de afweging tussen regio's.

## 2.4 Samenhang met overige ontwikkelingen van het energiesysteem

In dit onderzoek wordt gekeken naar de integratie van wind op zee in het energiesysteem, maar de opgave voor de inpassing van wind op zee staat niet op zichzelf. De verschillende ontwikkelingen van het energiesysteem zijn met elkaar verbonden, zowel lokaal als nationaal. Op nationaal niveau moet, op elk moment van het jaar, voldaan worden aan de energievraag. Dit betekent dat er dus een samenhang zit tussen de ontwikkeling van wind op zee en andere energiebronnen, maar ook met de ontwikkeling van de energievraag. Op lokaal niveau zit er ook een afhankelijkheid, aangezien de lokale afnemers en producenten gebruik maken van dezelfde energie-infrastructuur. Dit betekent dat ook de ontwikkeling van vraag, overig aanbod en flexibiliteit bepalen wat de impact is van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land.

Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen die impact hebben op systeemintegratie van wind op zee. Daarbij geven we ook aan hoe deze ontwikkelingen meegenomen worden in de beoordeling Systeemintegratie:

- **Ontwikkelingen rondom flexibiliteit.** Flexibiliteit speelt een belangrijke factor op de systeemintegratie van wind op zee. In paragraaf 2.4.1 gaan we hierop in. Daarnaast gaan we in een gevoeligheidsanalyse uitgebreid in op de relatie tussen flexibiliteit en de inpassing van wind op zee. Deze is te vinden in paragraaf 5.2.
- **Ontwikkeling energie-intensieve industrie in Nederland:** Er is nog veel onzekerheid rondom de toekomst van (een deel van) de Nederlandse energie-intensieve industrie in Nederland. De ontwikkeling van de energie-intensieve industrie heeft veel impact op de binnenlandse energievraag en daarmee op de benodigde hoeveelheid elektriciteit en waterstof vanuit wind op zee. Daarnaast heeft het impact op de vraag naar elektriciteit en waterstof op de aansluitlocaties en daarmee op de inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur op land. In de twee doorgerekende scenario's zit een verschil in de ontwikkeling van de industrie. Daarnaast gaan we in een gevoeligheidsanalyse uitgebreid in op de plannen van de industrieclusters (in de CES 3.0) en de impact hiervan op de inpassing van wind op zee. Deze is te vinden in paragraaf 5.3.
- **Mogelijke ontwikkeling kernenergie.** De mogelijke ontwikkeling van nieuwe kerncentrales heeft effect op het totale aanbod aan elektriciteit en daarmee op de benodigde hoeveelheid elektriciteit en waterstof vanuit wind op zee. Daarnaast heeft de mogelijke ontwikkeling van (meer) kernenergie in Zeeland, Zuid-Holland of Noord-Nederland impact op de hoeveelheid wind op zee die kan aanlanden in die regio's. De ontwikkeling van kernenergie wordt, in verschillende hoeveelheden, meegenomen in beide energetische scenario's. Daarnaast gaan we hier in een gevoeligheidsanalyse in meer detail op in. Deze is te vinden in paragraaf 5.4.
- **Verhouding tussen vraag naar verschillende energiedragers.** Het is nog onzeker hoe het energiesysteem zich richting 2050 gaat ontwikkelen. Sommige dingen zijn zeker, bijvoorbeeld dat elektrificatie in een groot deel van de sectoren de meest logische verduurzamingsoptie is en dat er daardoor fors meer elektriciteitsvraag gaat komen. Maar in sommige sectoren is het nog onduidelijk hoe de verduurzaming eruit gaat zien. Gaan bedrijven vooral inzetten op elektrificatie, gaat waterstof een grote rol spelen of wordt gekozen voor fossiel + CCS? Dit heeft impact op de energievraag per energiedrager en daarmee op de benodigde hoeveelheid elektriciteit en waterstof vanuit wind op zee en de energievraag bij aansluitlocaties. De

verhouding tussen de vraag naar verschillende energiedragers verschilt tussen de twee onderzochte energetische scenario's.

- **Export elektriciteit naar Duitsland en België.** België heeft veel minder potentie voor hernieuwbare elektriciteitsproductie dan Nederland en een grote industriële sector die ook wil elektrificeren of gebruik willen maken van waterstof. Duitsland heeft als geheel veel potentie voor hernieuwbare productie, maar in de regio Noordrijn-Westfalen is veel industrie en relatief weinig potentie voor opwek<sup>13</sup>. Daarom kan overwogen worden om een deel van de productie van wind op zee in te zetten voor doorvoer naar België en mogelijk Noordrijn-Westfalen in Duitsland. De windenergie moet dan vanaf de Noordzee richting de grenzen getransporteerd worden, wat impact heeft op de belasting van het hoogspanningsnet in Nederland. De interconnectiecapaciteit en de totale export verschilt tussen de twee onderzochte energetische scenario's.
- **Ontwikkeling energie-infrastructuur op land.** De analyses voor systeemintegratie worden uitgevoerd voor het zichtjaar 2040. Op dit moment is er al veel energie-infrastructuur aanwezig en tot 2040 staan al veel investeringen voor nieuwe projecten op de planning. In de analyses voor de beoordeling zijn de huidige situatie en de geplande investeringen de uitgangssituatie. Dit betekent dat aangenomen wordt dat de geplande investeringen in ieder geval gerealiseerd worden. Investeringsbeslissingen die opgenomen zijn in het investeringsplan van netbeheerders of waar een investeringsbeslissing voor is gedaan, worden meegenomen. We doen een gevoeligheidsanalyse voor een specifieke ontwikkeling van de energie-infrastructuur op land, in paragraaf 5.5. Daarnaast gaan we bij de beoordeling *Toekomstvastheid* in hoofdstuk 13 dieper in op de geplande uitbreidingen en de afhankelijkheid van de inpassing van wind op zee van deze uitbreidingen.

#### 2.4.1 Flexibiliteitsbronnen

Richting 2040 zal de inzet van flexibiliteitsbronnen, zoals batterijen en elektrolyzers, noodzakelijk zijn voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit. Maar inzet van flexibiliteitsbronnen heeft ook impact op de aanlanding van wind op zee, met name voor elektriciteit. Inzet van flexibiliteitsbronnen kan ervoor zorgen dat de productie van de windparken op zee beter aansluit bij de elektriciteitsvraag, door flexibele vraag of opslag van elektriciteit. Zo kan meer windenergie gebruikt worden in de vorm van elektriciteit. Daarnaast kan de geproduceerde waterstof van elektrolyse benut worden voor het invullen van de vraag naar waterstof.

Flexibiliteit draagt niet alleen bij aan meer benutting van windenergie door vraag en aanbod van elektriciteit op uurbasis beter in balans te brengen. De voorziene vraag van flexibele bronnen, en dan met name van elektrolyse, zijn ook qua volume een aanzienlijk aandeel in de totale elektriciteitsvraag. In het scenario Nationaal Leiderschap is de totale productie van elektriciteit in 2040, inclusief wind op zee, 400 TWh. De basisvraag naar elektriciteit is in dat scenario ongeveer 245 TWh. Daarbovenop komt nog een elektriciteitsvraag van ongeveer 100 TWh van flexibele bronnen, en dan met name van elektrolyse.

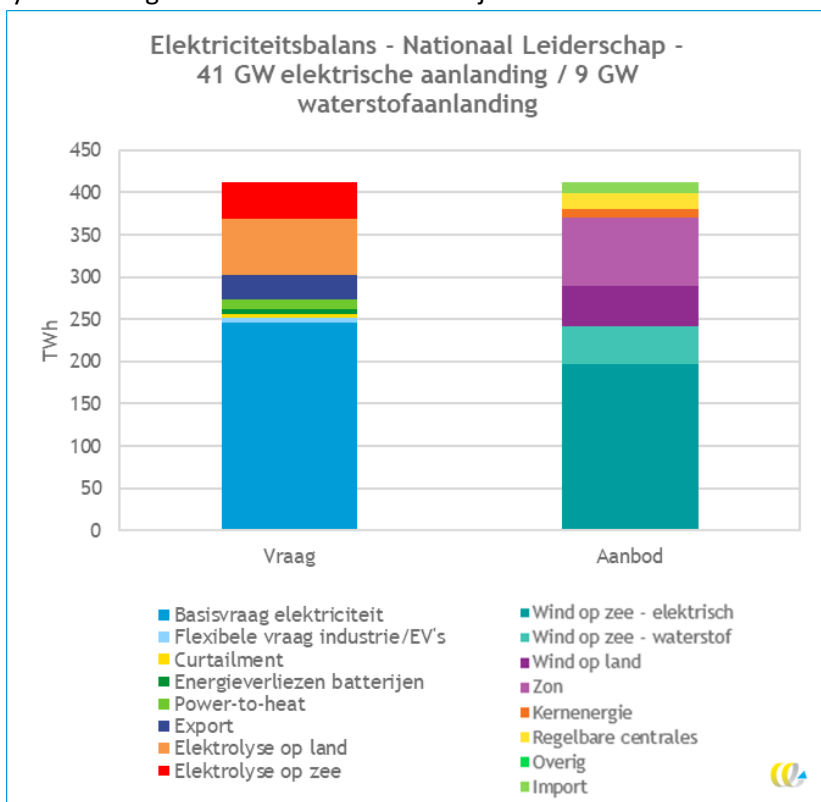
---

<sup>13</sup> Er wordt voor Noordrijn-Westfalen al gewerkt aan 18 GW diepe aanlandingen vanaf de Duitse windparken in de Noordzee. In dat geval wordt de noodzaak voor doorvoer van elektriciteit vanaf de Nederlandse windparken op zee kleiner.

### Analyse op basis van scenario, geen absolute waarheid

De onderstaande analyses zijn uitgevoerd voor het scenario Nationaal Leiderschap 2040. Dit scenario geeft een inschatting van de mogelijke ontwikkeling van het energiesysteem en de analyses geven daarmee een indicatie van de benutting van wind op zee in 2040, maar dit is geen absolute waarheid. Het is mogelijk dat de daadwerkelijke ontwikkelingen afwijken. Bij andere ontwikkelingen van vraag en de overige opwek zullen onderstaande resultaten anders uitvallen. In dit geval zal de algemene conclusie, dat een scenario met 50 GW wind op zee in 2040 met (vrijwel) geen elektrolyse en overige flexibele bronnen (en de verwachte vraagontwikkeling richting 2040) vanuit systeemintegratie bezien niet efficiënt lijkt, naar verwachting echter niet anders uitvallen.

Als de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibele bronnen minder van de grond komt, dan is de binnenlandse vraag naar elektriciteit tot 100 TWh lager. Dit komt overeen met ruim 20 GW wind op zee. Bij het uitgangspunt van het onderzoek, maximaal 50 GW wind op zee in 2040, zullen er dan forse overschotten zijn aan elektriciteit. Een deel van deze overschotten kunnen mogelijk geëxporteerd worden, en daarmee nuttig benut worden in het buitenland. En mogelijk kan er nog extra elektriciteitsvraag gerealiseerd worden. Maar naar verwachting zal in dat geval ook een groot deel van de geproduceerde elektriciteit niet meer benut kunnen worden en gecurtaild moeten worden. Dit betekent dat een scenario met 50 GW wind op zee in 2040 met (vrijwel) geen elektrolyse en overige flexibele bronnen (en de verwachte vraagontwikkeling richting 2040) vanuit systeemintegratie bezien niet efficiënt lijkt.



Figuur 2-1 Elektriciteitsbalans bij scenario Nationaal Leiderschap 2040 – 41 GW elektrische aanlanding en 9 GW waterstofaanlanding

De ontwikkeling van flexibiliteit heeft dus een belangrijke impact op de systeemintegratie van wind op zee. Er zijn echter nog grote onzekerheden rondom de ontwikkeling van flexibiliteit die nodig is voor het balanceren van vraag en aanbod:

- **Ontwikkeling totale hoeveelheid flexibele bronnen.** Het is nog onzeker hoe groot de totale flexibele vraag naar elektriciteit wordt.
- **Verhouding tussen verschillende flexibele bronnen elektriciteit.** Vraag en aanbod van elektriciteit moeten op elk moment in evenwicht zijn. Voor het opvangen van overschotten van wind op zee zullen naar verwachting verschillende flexibele bronnen ingezet worden, zoals batterijen, elektrolyzers, curtailment, vraagsturing en power-to-heat. Maar hoeveel van deze flexibele bronnen gerealiseerd wordt en op welke uren deze ingezet worden, is nog onzeker.
- **Flexibele elektrolyse op land of op zee, of allebei.** Bij radiale aansluitingen wordt een elektrolyser op zee direct gekoppeld aan een windpark en wordt de volledige productie van dit windpark omgezet in waterstof. Het is de verwachting dat bij radiale aansluitingen ook nog elektrolyzers op land noodzakelijk zijn die flexibel opereren en (lange-termijn) overschotten van elektriciteit van windparken op zee op te vangen. Echter, bij hybride aansluitingen (zie paragraaf 2.2.2) kan ook flexibele elektrolyse toegepast worden op zee. In dat geval is minder of mogelijk zelfs geen flexibele elektrolyse op land nodig. Het is op dit moment nog niet duidelijk hoe de optimale configuratie eruit ziet en welke verhouding tussen elektrolyse op land en elektrolyse op zee wenselijk is, hier is nog verder onderzoek naar nodig.

Flexibele bronnen hebben ook een belangrijke impact op de inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur op land. Hier gaan we in paragrafen 5.2 en bij de resultaten per regio uitvoerig op in.

## 3 Methodiek beoordeling systeemintegratie

### 3.1 Introductie

In dit hoofdstuk beschrijven we de beoordelingsmethodiek voor de systeemintegratie. Het gaat hierbij om de beoordeling van elektrische aanlandingen (3.4), waterstofaanlandingen (3.5) en elektrolyzers (3.6). De focus van de beoordeling ligt op de optimale inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur. In de hierop volgende hoofdstukken wordt deze methodiek gebruikt voor de potentiële aansluitlocaties in de zes verschillende regio's en tot slot de overkoepelende conclusies.

Belangrijke input voor de beoordeling zijn netdoorrekeningen van Gasunie en TenneT, en aanvullende gevoeligheidsanalyses. Deze analyses geven een inschatting van de effecten van de impact van de aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. Meer informatie hierover is te vinden in paragraaf 1.3.

### 3.2 Algemene uitgangspunten

De algemene uitgangspunten bij de beoordeling voor systeemintegratie zijn:

- We beoordelen de effecten ten opzichte van een referentiesituatie zonder extra aanlanding van wind op zee boven op de bestaande plannen routekaart windenergie op zee 21 GW.
- We kijken in de beoordeling naar zichtjaar 2040. De ontwikkelingen gedurende de periode 2031-2040 en een doorkijk naar 2050 volgen bij de beoordeling van het thema Toekomstvastheid. De belangrijkste inzichten voor Systeemintegratie bespreken we in hoofdstuk 13.
- We gaan uit van realisatie van de onderzoeksopgave van 50 GW wind op zee in 2040. We nemen aan dat hiervoor tussen 2031 en 2040 tien elektrische aanlandingen en één of twee waterstof-aanlandingen gerealiseerd worden.
- In de beoordeling nemen we aan dat het energiesysteem altijd kloppend is. Dit betekent dat we aannemen dat vraag en aanbod ten alle tijden in balans zijn en dat alle energie getransporteerd kan worden vanaf de windparken op de Noordzee naar de eindgebruikers. Bij de beoordeling beschouwen we welke ingrepen aan energie-infrastructuur noodzakelijk zijn om dit te kunnen faciliteren.
- We gaan voor de overige ontwikkelingen van het energiesysteem uit van de ontwikkelingen van de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie uit de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (ii3050)<sup>14</sup>.
- We nemen aan dat alle geplande uitbreidingen van de energie-infrastructuur in 2040 gerealiseerd zijn. Dit is dus de referentiesituatie. Investeringskosten die opgenomen zijn in het

---

<sup>14</sup> Er is gebruik gemaakt van de ii3050 scenario's uit 2023. Ondertussen hebben de netbeheerders nieuwe scenario's opgesteld voor 2040, die gebruikt worden voor de nieuwe investeringsplannen. Deze nieuwe scenario's zijn een update van de scenario's uit 2023. In de bijlage B Verschillen en Gevoeligheidsanalyse gaan we in op de verschillen tussen de gehanteerde scenario's en de nieuwe scenario's van Netbeheer Nederland. Het is op het moment van schrijven nog niet bekend wat de impact is van deze nieuwe scenario's op de conclusies over de effecten van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land, aangezien er nog geen netdoorrekeningen zijn uitgevoerd.

investeringsplan van netbeheerders of waar een investeringsbeslissing voor is gedaan, worden meegenomen<sup>15</sup>.

- In de energiesysteemstudie voor elektriciteit gaan we uit van N-1 redundantie<sup>16</sup>.

### 3.3 Beoordeelde effecten

De focus bij de beoordeling ligt op de effecten van de aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur. We beoordelen de mate van ingrepen die nodig zijn bij de energie-infrastructuur. In onderstaande beoordelingstabel, Tabel 3-1, staan de drie opties voor beoordeling. In enkele gevallen, zoals bij de impact van elektrolyzers op de hoogspanningsverbindingen, kunnen ingrepen aan de energie-infrastructuur voorkomen worden. In dat geval wordt afgeweken van onderstaande beoordeling.

#### Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van de netbeheerders leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

Tabel 3-1 Algemene beoordelingstabel systeemintegratie

Effect	Toelichting beoordeling
Geen ingrepen	Geen ingreep energie-infrastructuur noodzakelijk
Beperkte ingrepen of onzeker	Beperkte ingrepen (bijvoorbeeld operationele ingreep) in energie-infrastructuur noodzakelijk of onzeker of ingreep noodzakelijk is
Grote ingrepen	Grote ingreep energie-infrastructuur noodzakelijk

Voor de beoordeling wordt onderscheid gemaakt tussen aanlandingen in de vorm van waterstof en elektriciteit. Daarnaast vindt er ook een beoordeling van elektrolyzers plaats, aangezien grootschalige elektrolyzers in de buurt van aansluitlocaties van wind op zee separaat zullen moeten worden aangesloten op een hoogspanningsstation. Dit heeft ook weer effect op de aansluitcapaciteit en het totale elektriciteits- en waterstofnetwerk.

Hieronder volgen per categorie de effecten die beoordeeld worden. Deze worden in respectievelijk paragraaf 3.4, 3.5 en 3.6 verder toegelicht.

<sup>15</sup> Het Waterstofnetwerk Nederland is niet opgenomen in investeringsplannen, maar nemen we wel mee aangezien hier wel al een uitrolplan voor ligt.

<sup>16</sup> Dit betekent dat het elektriciteitsnet ook nog alle energie moet kunnen transporteren als één component uitvalt, bijvoorbeeld door een calamiteit. Er is dus een reservecomponent. Deze N-1 redundantie dient overal in het hoogspanningsnet te gelden.

## Elektriciteit

- De hoeveelheid nieuwe infrastructuur op zee vanaf het windpark op zee tot de aansluitlocatie.
- De beschikbare aansluitcapaciteit op het 380kV-station bij de aansluitlocatie.
- De effecten van de elektrische aanlanding in een regio op de capaciteit van de afvoerende hoogspanningsverbindingen.
- De effecten van de elektrische aanlanding van alle regio's gezamenlijk op het totale hoogspanningsnetwerk.

## Waterstof

- De hoeveelheid aan nieuwe infrastructuur op zee vanaf het windpark tot de aanlandlocatie.
- De hoeveelheid aan nieuwe infrastructuur, zoals buisleidingen op land, vanaf de aanlandlocatie tot het aansluitpunt van het Waterstofnetwerk Nederland.
- De effecten van aanlanding van waterstof op het Waterstofnetwerk Nederland.

## Elektrolyse

- De beschikbare aansluitcapaciteit van elektrolyzers op hoogspanningsstations.
- De impact van de elektrolyzers op hoogspanningsverbindingen.
- De impact van elektrolyzers op de waterstofinfrastructuur.
- Mogelijkheid benutting restwarmte.
- Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse.

### Samenhang tussen verschillende elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyse

Er worden separate beoordelingen uitgevoerd voor elektrische aanlanding, waterstofaanlanding en elektrolyzers. Maar er zit in werkelijkheid een wisselwerking tussen deze componenten. Zo hebben elektrolyzers impact op de inpassing van elektrische aanlanding (concurreren voor aansluitcapaciteit, elektrolyzers verminderen belasting op hoogspanningsverbindingen) en waterstofaansluitingen (combinatie elektrolyse op land en waterstofaanlanding zorgt voor meer waterstoftransport vanaf aansluitlocaties). In paragraaf 3.6.6 bespreken we hoe we omgaan met deze afhankelijkheden.

## 3.4 Beoordelingsmethodiek elektrische aanlandingen

### 3.4.1 Algemeen

In de integrale effectanalyse worden potentiële elektrische aanlandingen beoordeeld. Hierin wordt onderscheid gemaakt in routes op zee en routes op land. Voor systeemintegratie is met name de aansluitlocatie, het eindpunt van de routes, van belang aangezien de routes hier worden aangesloten op het energiesysteem op land. Hoe de routes zelf lopen, zowel het deel onder de Noordzee als het deel onder land, is voor de impact op het energiesysteem op land niet van belang. Dit is alleen relevant voor het beoordeelde effect *Hoeveelheid nieuwe energie-infrastructureur op zee tot aansluitlocatie*. Bij de overige effecten maken we geen onderscheid tussen verschillende routes die eenzelfde aansluitlocatie hebben, per aansluitlocatie volgt één beoordeling.

Daarnaast is bij systeemintegratie niet alleen de impact van individuele elektrische aanlandingen van belang, maar voor meerdere effecten is met name de gezamenlijke impact van de aanlandingen van

belang. Daarom vindt de beoordeling van het thema systeemintegratie plaats op drie niveaus. We maken onderscheid tussen de volgende drie niveaus:

- Individuele routes
- Totaal aantal aanlandingen per regio
- Totaal van alle aanlandingen

De onderstaande tabel geeft aan naar welk niveau we kijken bij de vier beoordeelde effecten.

*Tabel 3-2 Niveaus beoordeling bij effecten elektrische aanlandingen*

Beoordeeld effect	Hele route of alleen aansluitlocatie van belang?	Beoordeling op niveau
De beschikbare aansluitcapaciteit op het 380kV-station	Alleen aansluitlocatie	Individuele routes
De effecten van de elektrische aanlanding op de capaciteit van de afvoerende hoogspanningsverbindingen.	Alleen aansluitlocatie	Per regio
De effecten van de elektrische aanlanding op het totale elektriciteitsnet.	Alleen aansluitlocatie	Hele set aanlandingen
De hoeveelheid aan nieuwe infrastructuur vanaf het windpark op zee tot de aansluitlocatie.	Hele route	Individuele routes

Bij de eerste effecten, die ingaan op de impact van aanlanding van wind op zee op de hoogspanningsinfrastructuur op land, zijn twee assen van belang:

- **Ernst ingreep.** Bij het bepalen van de impact van aanlanding van wind op zee op de hoogspanningsinfrastructuur op land is van belang of de bestaande infrastructuur het aansluiten en transporteren van elektriciteit kan faciliteren of niet. Indien de bestaande (en geplande) hoogspanningsinfrastructuur voldoende capaciteit heeft, dan is er geen probleem. Maar als er onvoldoende capaciteit is, dan is een ingreep noodzakelijk. Welke ingreep noodzakelijk is, is afhankelijk van de mate van overschrijding van de capaciteit (in tijd en/of omvang). Bij een beperkte overschrijding van de capaciteit kan het probleem naar waarschijnlijkheid met een operationele ingreep of een beperkte uitbreiding opgelost worden. De mate van overschrijding of ingreep bepaalt de beoordeling voor de elektrische aanlandingen. In de volgende paragrafen bespreken we per type effect hoe we de ernst van de ingreep beoordelen en om welke (potentiële) ingrepen het dan gaat.
- **Robuustheid/overige ontwikkelingen energiesysteem.** De ontwikkelingen rondom wind op zee staan niet op zichzelf. Het hele energiesysteem zal ingrijpend veranderen richting 2040. De overige ontwikkelingen in het energiesysteem hebben een impact op de systeemintegratie van wind op zee, met name op de impact van wind op zee op de hoogspanningsverbindingen. Daarom is het niet mogelijk om één beoordeling per verbinding of regio te doen. Dit vangen we op door naar de robuustheid van de beoordeling te kijken. Hierbij geven we aan in welke mate de impact van wind op zee op de hoogspanningsinfrastructuur, en dus de beoordeling, afhankelijk is van de overige ontwikkelingen van het energiesysteem. Daarbij ligt de focus op de volgende overige ontwikkelingen:
  - Ontwikkeling elektriciteitsvraag
  - Ontwikkeling flexibiliteit, inclusief elektrolyse
  - Ontwikkeling kernenergie

Belangrijke input voor de beoordeling zijn netdoorrekeningen van TenneT. Deze analyses geven een inschatting van de effecten van de impact van de aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land, bij twee energetische scenario's en verschillende configuraties voor wind op zee. Meer hierover is te vinden in paragraaf 1.3.1.

Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de afhankelijkheid van specifieke ontwikkelingen te onderzoeken. Dit is belangrijke input voor het onderdeel robuustheid/overige ontwikkelingen energiesysteem. De inzichten van de gevoeligheidsanalyses worden meegenomen in de beoordeling van de regio's. Daarnaast bespreken we de resultaten van de gevoeligheidsanalyses separaat in hoofdstuk 5. Meer informatie hierover is te vinden in paragraaf 1.3.3.

In de volgende paragrafen zullen eerst de vier beoordeelde effecten worden toegelicht. Vervolgens zal verder worden ingegaan op de samenhang tussen deze effecten en de samenhang met elektrolyse en flexibiliteitsbronnen.

### 3.4.2 Hoeveelheid nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Voor het realiseren van de aanlanding van elektriciteit van wind op zee is nieuwe energie-infrastructuur op zee en op land tot aan de aansluitlocatie nodig. We nemen dit ook mee bij de beoordeling systeemintegratie, om een totaalbeeld te schetsen van de benodigde energie-infrastructuur, zowel op zee als op land.

Bij dit effect beoordelen we voor de verschillende alternatieven hoeveel nieuwe infrastructuur nodig is tot aan de aansluitlocatie, op basis van de afstand van de verbinding vanaf het windpark op zee tot het 380kV-station. Hierbij is, in tegenstelling tot de andere beoordeelde effecten, ook het verloop van de route en niet alleen het eindpunt van belang. We bepalen per aansluitlocatie hoeveel kilometer aan elektriciteitsinfrastructuur op zee aangelegd moet worden. Aangezien er meerdere routes richting dezelfde aansluitlocatie lopen is dit geen vaste waarde, maar een range.

De beoordeling van dit effect verloopt via een relatieve schaal. Hoe korter de afstand van de route, hoe beter de beoordeling. Hiervoor hebben we voor de routes richting alle potentiële aansluitlocaties geanalyseerd.

*Tabel 3-3 Beoordelingstabel hoeveelheid nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen*

Effect	Toelichting beoordeling
<b>Korte lengte</b>	De route heeft een relatief kleine lengte (aantal kilometer) ten opzichte van de andere routes
<b>Gemiddelde lengte</b>	De route heeft een gemiddelde lengte (aantal kilometer) ten opzichte van de andere routes
<b>Grote lengte</b>	De route heeft een relatief grote lengte (aantal kilometer) ten opzichte van de andere routes.

### 3.4.3 Beschikbare aansluitcapaciteit bij 380kV-stations

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang. Deze beoordeling doen we per 380kV-station, aangezien er geen samenhang is met aansluitcapaciteit bij andere stations in de regio of in de rest van Nederland.

Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk

binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Hierbij zijn ook andere ontwikkelingen rond het energiesysteem van belang. Hoeveel aansluitcapaciteit beschikbaar is op een station is afhankelijk van de hoeveelheid aansluitcapaciteit die noodzakelijk is voor andere ontwikkelingen. Andere grootschalige ontwikkelingen, zoals kerncentrales of elektriciteitsvraag van grote industrie, moeten ook aangesloten worden op een 380kV-station en maken dus ook aanspraak op de beschikbare aansluitcapaciteit. De robuustheid wordt bij dit effect meegewogen in de drie beoordelingsschalen.

De onderstaande tabel geeft de uitwerking van de beoordelingsschaal weer.

*Tabel 3-4 Beoordelingstabel aansluitcapaciteit elektrische aanlandingen*

Effect	Toelichting beoordeling
<b>Geen ingreep</b>	Verbinding kan met grote zekerheid aangesloten worden op het 380kV-station, zonder forse uitbreidingen binnen het station.
<b>Beperkte ingreep of onzeker</b>	Verbinding kan naar verwachting aangesloten worden op 380kV-station, maar: - Hier is een uitbreiding voor nodig binnen het station; - Het is nog onzeker of er voldoende aansluitcapaciteit is, dit is afhankelijk van overige ontwikkelingen (zoals ontwikkeling elektriciteitsvraag of kernenergie) <sup>17</sup> .
<b>Grote ingreep</b>	Elektrische aanlanding kan naar verwachting niet aangesloten worden op het 380kV-station. Dus er is een nieuw station nodig.

Er kunnen mogelijk meerdere elektrische aanlandingen bij één station aangesloten worden. Daarom geven we aan hoeveel aanlandingen aangesloten kunnen worden zonder ingreep of met een beperkte ingreep.

*Tabel 3-5 Indicatieve beoordeling aansluitcapaciteit elektrische aanlandingen*

Effect	Beoordeling
<b>Geen ingreep</b>	Aansluiten één verbinding
<b>Beperkte ingreep of onzeker</b>	Aansluiten tweede verbinding (bij uitbreiding binnen station)
<b>Grote ingreep</b>	Meer dan twee verbindingen

### 3.4.4 Effect op hoogspanningsverbindingen (380kV)

Elektriciteit die lokaal bij de aansluitlocatie niet wordt verbruikt, zal naar vraag elders in het land getransporteerd moeten worden middels bovengrondse 380kV-verbindingen. Er dient voldoende transportcapaciteit beschikbaar te zijn voor het afvoeren van elektriciteit van windparken op zee richting de rest van Nederland. We kijken bij dit aspect naar het effect van aanlanding in een regio op de nabijgelegen 380kV-verbindingen (daarnaast kijken we ook nog naar de totale impact van elektrische aanlanding in alle regio's op het 380kV-net, zie paragraaf 3.4.5).

Deze beoordeling zal plaatsvinden op het niveau van een regio, aangezien de aanlanding van verschillende routes en bij verschillende stations impact hebben op dezelfde 380kV-verbindingen. Het is daarom niet voldoende om naar individuele routes of stations te kijken.

<sup>17</sup> In de beoordeling wordt aangegeven van welke (potentiële) ontwikkeling dit afhankelijk is.

De beoordeling van dit effect gebeurt op basis van de mate van overschrijding van de transportcapaciteit. Voor elke overschrijding is een oplossing noodzakelijk. Het is echter niet zo dat altijd nieuwe energie-infrastructuur noodzakelijk is. Welke oplossing nodig is, is afhankelijk van de ernst van de overschrijding, wat wordt bepaald op basis van de hoeveelheid energie die op jaarbasis niet getransporteerd kan worden (aangeduid als Energy Not Transported (ENT)). Als dit een kleine hoeveelheid is, kan het knelpunt vaak opgelost worden met een operationele ingreep, met redispatch<sup>18</sup>. Als grote hoeveelheden energie niet getransporteerd kunnen worden dan is het knelpunt niet operationeel op te lossen en is een grote ingreep noodzakelijk (zoals aanleg nieuwe hoogspanningsverbinding). We hanteren de volgende beoordelingstabel.

*Tabel 3-6 Beoordelingstabel effect op afvoerende hoogspanningsverbindingen elektrische aanlandingen*

Effect	Toelichting beoordeling
<b>Geen ingreep</b>	Er is voldoende transportcapaciteit beschikbaar
<b>Beperkte ingreep</b>	Er is sprake van overschrijding van de transportcapaciteit, maar dit kan naar verwachting operationeel opgelost worden met redispatch
<b>Grote ingreep</b>	Er is sprake van ernstige overschrijding van de transportcapaciteit en daarmee een grote ingreep noodzakelijk.

Per regio kunnen mogelijk meerdere elektrische aanlandingen gerealiseerd worden, die allen gebruik maken van de afvoerende hoogspanningsverbinding. Daarom geven we aan hoeveel aanlandingen maximaal in een regio gerealiseerd kunnen worden zonder ingreep of met een beperkte ingreep.

<sup>18</sup> 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. We gaan uit van een technische grens van maximaal 0,5 TWh/jaar (economisch gezien is bij een lagere grens verzwaaring al voordeliger). Dit is nadrukkelijk een vuistregel; de daadwerkelijke redispatch-mogelijkheden zullen per locatie verschillen en zijn sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van regelbaar vermogen op de juiste locaties in het net.

### Wat zijn de mogelijke grote ingrepen?

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's. Dat is financieel, ruimtelijk en organisatorisch uitdagend. Daarnaast is dan van belang dat de additionele vraag en de productie van de windparken op zee in balans zijn met elkaar. Anders bestaat het risico dat de additionele vraag de overschrijdingen op de 380kV-verbindingen niet oplost, of dat nieuwe overschrijdingen ontstaan op momenten met weinig productie van wind op zee.
- **Marketingrepen.** Hierbij wordt door de netbeheerder ingegrepen in de markt op momenten dat een overschrijding door productie van wind op zee dreigt. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marketingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep. Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Op die manier dwingt de netbeheerder curtailment af. Dit levert echter wel maatschappelijke kosten op. Zo'n tijdsduurgebonden transportrecht kan ook tijdelijk toegepast worden, totdat een benodigde netverzwaring gedaan is.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Daarin identificeren we alleen of

Hierbij zijn de overige ontwikkelingen van het energiesysteem erg relevant. Extra elektriciteitsvraag en/of flexibiliteit in een regio zorgt ervoor dat meer elektriciteit van de elektrische aanlandingen direct benut kunnen worden en dat er minder stroom doorgevoerd hoeft te worden. Hierdoor kunnen mogelijk extra elektrische aanlandingen gerealiseerd worden. Aan de andere kant zorgt extra productie in de regio, van bijvoorbeeld kernenergie, voor meer lokale overschotten die afgevoerd moeten worden met dezelfde hoogspanningsverbindingen. Hierdoor kunnen dus mogelijk minder elektrische aanlandingen gerealiseerd worden.

We gaan hiermee om door een losse beoordeling te doen voor de twee energetische scenario's die doorgerekend zijn. Dit zijn de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie van de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050. Hieronder volgt een korte omschrijving van beide scenario's:

- **Nationaal leiderschap.** In dit scenario wordt maximaal ingezet op elektrificatie van de energievraag, waardoor er een grote elektriciteitsvraag is. Er is naast wind op zee veel hernieuwbare opwek op land. De rol van kernenergie is beperkt. In dit scenario kan, door de forse elektriciteitsvraag in de industrieclusters en beperkte rol van kernenergie, naar verwachting veel elektrische aanlanding van wind op zee ingepast worden.
- **Europese Integratie.** In dit scenario wordt naast elektrificatie ook ingezet op duurzame gassen voor verduurzaming, waardoor de elektriciteitsvraag lager ligt. Er wordt hier ingezet

op meer kernenergie (4 GW in 2040 en 8 GW in 2050) dan bij het scenario Nationaal Leiderschap. In dit scenario kan, door de lagere elektriciteitsvraag en forse productie van kerncentrales, naar verwachting minder elektrische aanlanding van wind op zee ingepast worden. Daarnaast is er in dit scenario meer interconnectiecapaciteit bij het elektriciteitsnet vanwege de Europese focus.

Daarnaast geven we een indicatie van andere afhankelijkheden, op basis van de gevoeligheidsanalyses (zie hoofdstuk 5).

### 3.4.5 Totale impact op landelijk 380kV-net

De elektrische aanlandingen van windparken op zee hebben niet alleen impact op de afvoerende hoogspanningsverbindingen bij de aansluitlocatie zelf, maar ook op het elektriciteitsnet dieper landinwaarts, met name op de landelijke ring van het 380kV-net. Het effect op het totale net wordt afgewogen voor de gehele set aan potentiële aanlandingen. Daarnaast is bij dit punt de wisselwerking tussen de aanlanding in verschillende regio's van belang.

Hierbij kijken we naar de volgende aspecten:

- Algemene uitspraken over globale verdeling aanlanding in heel Nederland (bijvoorbeeld meer spreiding is gunstig, meer diep landinwaarts is gunstig).
- Afhankelijkheden tussen regio's. Heeft aanlanding wind op zee in de ene regio impact op de mogelijkheden in de andere regio?

Om tot deze inzichten te komen abstraheren we de belangrijkste conclusies uit de doorrekeningen van de verschillende energetische scenario's en aanlandconfiguraties. Deze regio-overstijgende conclusies bespreken we in hoofdstuk 4.

### 3.4.6 Samenhang tussen verschillende beoordeelde effecten

De drie beoordeelde effecten die gaan over de impact op de hoogspanningsinfrastructuur op land worden op een verschillend niveau beoordeeld en doen dus ook voor een ander niveau een uitspraak:

- Voor de keuze tussen stations binnen de regio is de aansluitcapaciteit van de verschillende stations, vanuit systeemintegratie, leidend.
- Voor het maximum aantal aansluitingen binnen de regio is de capaciteit van de afvoerende hoogspanningsverbindingen leidend.
- Voor de afweging tussen regio's is de beoordeling van de totale impact op het 380kV-net en de hoeveelheid nieuwe energie-infrastructuur tot de aansluitlocaties leidend.

Om een elektrische aanlanding te kunnen realiseren zowel aansluitcapaciteit, als transportcapaciteit op de afvoerende hoogspanningsverbindingen en het totale net noodzakelijk.

## 3.5 Beoordelingsmethodiek waterstofaanlandingen

### 3.5.1 Algemeen

Voor de beoordeling van systeemintegratie met betrekking tot de waterstofaanlandingen worden de mogelijke effecten op het gehele waterstofnetwerk ten gevolge van de aanlanding van wind op zee

beoordeeld. Concreet wordt bekeken of netwerkuitbreidingen (ingrepen) nodig zijn. Hierbij worden drie effecten onder de loep genomen:

- De hoeveelheid nieuwe infrastructuur op zee
- De hoeveelheid nieuwe infrastructuur vanaf de kust tot aan het nationale netwerk
- De effecten op het nationale Waterstofnetwerk Nederland

Er wordt voor elk van de aanlandregio's een inschatting gemaakt van de ingreep. Daarnaast wordt aangegeven of er een grote onzekerheid is voor de inpassing van de aanlanding of een risico dat een benodigde ingreep niet gerealiseerd kan worden. Dit wordt ook meegewogen in de beoordeling. Voor de beoordeling van het eerste effect worden de alternatieven die binnen PVAWOZ zijn ontwikkeld als basis gebruikt. Voor beoordeling op de andere twee effecten worden de resultaten van de netwerkberekeningen van Gasunie binnen deze studie gebruikt. Deze analyses geven een inschatting van de effecten van de impact van de aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land.

Er wordt bij de beoordeling van de waterstofaanlandingen naar vijf mogelijke aansluitlocaties gekeken: Eemshaven, Grijskerk, de Kop van Noord-Holland, Noordzeekanaalgebied en Maasvlakte/DRC. Er is steeds uitgegaan van een enkele buisleiding voor aanlanding van waterstof vanuit zee van 7 GW waterstof<sup>19</sup>. We onderzoeken de realisatie van één of twee waterstofaanlandingen. Bij twee waterstofaanlandingen zou de 7 GW worden verdeeld over twee aanlandlocaties. Maar met het doorrekenen van een volledige aanlanding op één locatie wordt de situatie met de grootste impact op het waterstofnetwerk op land onderzocht. Daarnaast is de capaciteit van een buisleiding voldoende om deze 7 GW waterstof (9 GW elektrolysecapaciteit) te kunnen transporteren, omdat de capaciteit wel kan oplopen tot 15 tot 25 GW (36" of 48"). Vanuit capaciteitsbehoefte is er dus geen noodzaak om twee leidingen aan te leggen bij een flow van 7,2 GW. Daarvoor moeten andere overwegingen een rol spelen.

Gasunie heeft bij de netwerkberekeningen de scenario's uit de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 versie 2 (I13050v2) gebruikt, alsmede de bijbehorende modellering en rekenmethodiek. Dit is aangevuld met aanvullende informatie van Gasunie over projecten waarvoor een Expression of Interest is afgesloten. Daarbij is Gasunie uitgegaan van de netwerktopologie van Waterstofnetwerk Nederland (WNL) in 2035 (zoals voorzien in april 2023), uitgebreid met ingrepen die zijn bepaald in I13050v2 voor het scenario Nationaal Leiderschap in 2040. Uit de analyse blijkt dat deze ingrepen in ieder geval nodig zijn, los van de keuzes omtrent waterstofaanlanding. Deze ingrepen zijn:

- Compressie in Noord-Nederland, het noorden van Noord-Brabant en het zuiden van Zuid-Holland. Deze compressie kan deels op of nabij bestaande compressielocaties voor aardgas worden geplaatst.
- Extra leidingverzwaringen naar de ondergrondse waterstofopslagen, elektriciteitscentrales en export richting België.
- Omzettingen van een aantal aardgasleidingen naar waterstof tussen Groningen en Noord-Brabant.

Voor de netwerkanalyse zelf heeft Gasunie de zwaarste transportsituaties voor het waterstofnetwerk doorgerekend, omdat deze laten zien welke ingrepen nodig zijn om knelpunten in het netwerk op te lossen. Het netwerk moet immers in staat zijn de waterstofvolumes te

---

<sup>19</sup> Dit is de energiewaarde van de geproduceerde waterstof. Dit komt overeen met 9 GWe opgesteld elektrolysevermogen.

transporteren in alle mogelijke vraag- en aanbodscenario's. Daarnaast wordt voor elk van de mogelijke aansluitlocaties de configuratie gebruikt waarin nabij de aansluitlocatie het meeste onshore elektrolyse staat opgesteld. Dit leidt namelijk tot de hoogste waterstofvolumes die naar het Waterstofnetwerk Nederland getransporteerd moeten worden. De analyseresultaten van deze 'worst-case-situatie' laten zien wat er maximaal aan ingrepen nodig is om aangelande en geproduceerde waterstof bij de betreffende aanlandlocatie te kunnen transporteren.

Bij de beoordeling kijken we naar de effecten van waterstofaanlanding tot 2040. Bij het thema *Toekomstvastheid* wordt ook een doorkijk gegeven naar de effecten van waterstofaanlanding op de energie-infrastructuur op land richting 2050. Dan zal meer waterstof aan land gebracht worden en zijn de effecten op het waterstofnetwerk groter (terwijl de impact op het waterstofnetwerk in 2040 nog beperkt is), dus het is de verwachting dat dit ook voor de uiteindelijke keuze richting 2040 van groot belang is. Dit bespreken we in hoofdstuk 13.

### 3.5.2 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op zee

Het eerste effect dat beoordeeld wordt voor de impact van verschillende waterstofaanlandlocaties betreft de hoeveelheid infrastructuur die nodig is op zee. Dit gaat concreet om het aantal kilometer aan nieuwe buisleidingen op zee, wat afhankelijk is van de afstand van elektrolyzers op zee tot de aanlandlocatie aan de kust.

*Tabel 3-7 Beoordelingstabel benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op zee waterstofaanlandingen*

Effect	Toelichting beoordeling
<b>Korte lengte</b>	De aanlandingsroute (van elektrolyzers op zee naar de aanlandlocatie) heeft een relatief kleine lengte (aantal kilometer) ten opzichte van de andere potentiële aanlandlocaties.
<b>Gemiddelde lengte</b>	De aanlandingsroute heeft een gemiddelde lengte (aantal kilometer) ten opzichte van de andere potentiële aanlandlocaties.
<b>Grote lengte</b>	De aanlandingsroute heeft een relatief grote lengte (aantal kilometer) ten opzichte van de andere potentiële aanlandlocaties.

Dit beoordelingsaspect wordt ook meegenomen bij de beoordeling kosten, techniek en veiligheid.

### 3.5.3 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op land tot aan nationaal netwerk

Het tweede effect voor de beoordeling van de impact van verschillende waterstofaanlandlocaties betreft de hoeveelheid nieuwe waterstofinfrastructuur die nodig is om aangelande waterstof te transporteren naar een invoerpunt op het Waterstofnetwerk Nederland (WNL).

De mogelijkheid van hergebruik van een bestaande buisleiding op land wordt buiten beschouwing gelaten. Er is dus een nieuwe buisleiding nodig. Dit geldt alleen voor het stuk tussen de aanlandlandzone naar een invoerpunt tot het WNL. Voor het WNL zelf worden wel bestaande buisleidingen hergebruikt.

Er wordt een inschatting gemaakt van de lengte aan nieuwe buisleidingen dat noodzakelijk is. Daarnaast wordt aangegeven hoe complex het is om deze nieuwe buisleidingen te realiseren. Dit wordt ook meegewogen in de beoordeling. Hieronder geven we weer hoe de beoordeling van dit aspect gedaan wordt.

Tabel 3-8 Beoordelingstabel benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op land tot aan nationaal netwerk waterstofaanlandingen

Effect	Toelichting beoordeling
Kleine ingreep en weinig risico's	Er is een nieuwe buisleiding nodig met een relatief korte lengte (enkele kilometers) en de complexiteit voor het realiseren van deze buisleiding is relatief beperkt.
Gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's	Er is een nieuwe buisleiding nodig met een gemiddelde lengte (orde grootte tien kilometers) en/of het realiseren van deze buisleiding is complex maar lijkt haalbaar.
Grote ingreep of grote risico's	Er is een nieuwe buisleiding nodig met een grote lengte (meer dan orde grootte tien kilometer) en/of het realiseren van deze buisleiding dusdanig complex dat realisatie onzeker is.

### 3.5.4 Benodigde uitbreidingen van het Waterstofnetwerk Nederland

Het derde effect voor de beoordeling van de impact van verschillende waterstofaanlandlocaties betreft benodigde uitbreidingen van de waterstofinfrastructuur behorend tot het Waterstofnetwerk Nederland, zoals buisleidingen en opgesteld compressievermogen. Bij de beoordeling worden ingrepen behorend tot het scenario 'Nationaal Leiderschap' van I13050 niet meegenomen, omdat deze bij alle aanlandlocaties nodig zijn (zie paragraaf 3.5.1).

Bij deze beoordeling wordt ook meegenomen of er risico is voor de aanlanding vanuit de projectplanning van het Waterstofnetwerk Nederland. Hieronder geven we weer hoe de beoordeling van dit aspect gedaan wordt.

Tabel 3-9 Beoordelingstabel effect benodigde uitbreidingen van het Waterstofnetwerk Nederland waterstofaanlandingen

Effect	Toelichting beoordeling
Geen ingreep en weinig risico's	Er zijn relatief geen (significante) aanvullende ingrepen nodig aan het WNL, bovenop het uitrolplan, en er zijn geen significante risico's dat aanlanding niet mogelijk is vanuit de projectplanning van het WNL.
Gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's	Er zijn beperkt aanvullende ingrepen nodig aan het WNL, bovenop het uitrolplan, en/of er zijn risico's dat aanlanding niet mogelijk is vanuit de projectplanning van het WNL.
Grote ingreep of grote risico's	Er zijn grote ingrepen nodig aan het WNL, bovenop het uitrolplan, en/of er zijn grote risico's dat aanlanding niet mogelijk is vanuit de projectplanning van het WNL.

## 3.6 Beoordelingsmethodiek elektrolyzers

### 3.6.1 Algemeen

Elektrolyzers produceren waterstof uit (overschotten van) elektrolyzers en kunnen op die manier bijdragen aan de integratie van elektrische aanlandingen van wind op zee. Er wordt binnen het Programma VAWOZ 2031-2040 gezocht naar geschikte locaties voor elektrolyzers bij (elektrische) aansluitlocaties van wind op zee. De focus van de beoordeling van de elektrolyzers ligt op de potentiële gunstige impact op elektrische aanlandingen en op de haalbaarheid. Echter, voor de ontwikkeling van elektrolyzers is wel belang dat er voldoende vraag is naar (binnenlands geproduceerde) groene waterstof. Als die vraag er niet komt, dan zal er geen afzetmarkt zijn voor exploitanten van elektrolyzers en zullen deze er naar verwachting ook niet komen. Dit valt echter buiten de scope van pVAWOZ en is daarom niet onderzocht.

Voor systeemintegratie is een losse beoordeling uitgevoerd voor elektrolyzers. Hierbij ligt de focus op grootschalige elektrolyzers die direct aangesloten worden op 380kV-stations (vanaf ongeveer 500

MW), aangezien de convertorstations voor elektrische aanlandingen van wind op zee ook op 380kV-stations aangesloten worden<sup>20</sup>.

Het doel van de beoordeling van elektrolyzers is anders dan de beoordeling van de elektrische aanlandingen en waterstofaanlandingen. Bij de aanlandingen is het doel om verschillende opties met elkaar te vergelijken. Bij elektrolyzers is dit niet het geval, als dat wenselijk en mogelijk is kunnen ook op alle potentiële locaties elektrolyzers gerealiseerd worden. Daarom kijken we voor de elektrolyzers per regio of het plaatsen van elektrolyzers **haalbaar** (binnen de bestaande en geplande energie-infrastructuur) en **gunstig** is voor systeemintegratie. Daarnaast bespreken we de noodzaak voor additionele elektrolyse in pVAWOZ, bovenop bestaande plannen.

We gaan bij de beoordeling ook in op de mogelijkheid van benutting van de restwarmte die vrijkomt bij elektrolyse. Bij elektrolyse komt ook zuurstof vrij als restproduct, per kilogram waterstof wordt acht kilo zuurstof geproduceerd. De geproduceerde zuurstof kan mogelijk toegepast worden in bepaalde industriële processen en voor beluchting in rioolwaterzuiveringsinstallaties. Het gebruik van zuurstof als restproduct kan de waarde van elektrolyzers vergroten. We doen geen beoordeling voor de mogelijkheid van benutting van zuurstof per regio, aangezien de focus bij de beoordeling systeemintegratie ligt op energie en niet op overige restproducten.

### 3.6.2 Aansluitcapaciteit elektrolyzers op hoogspanningsstations

Grootschalige elektrolyzers in de buurt van aansluitlocaties van wind op zee zullen separaat moeten worden aangesloten op een hoogspanningsstation, aangezien een directe koppeling tussen windparken op zee en elektrolyzers op land op dit moment niet toegestaan. Hierbij ligt de focus op grootschalige elektrolyzers die direct aangesloten worden op 380kV-stations (vanaf ongeveer 500 MW), aangezien de convertorstations voor elektrische aanlandingen van wind op zee ook op 380kV-stations aangesloten worden. Idealiter op een 380kV-station waar ook een aanlanding van wind op zee gerealiseerd wordt, anders zijn er meer transportstromen via de 380kV-verbindingen vanaf het station waar wind op zee aanlandt naar het station waar de elektrolyser wordt aangesloten. In dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit is en of het aansluiten van elektrolyzers dus haalbaar is. Hierbij hanteren we de volgende beoordelingstabel.

Tabel 3-10 Beoordelingstabel aansluitcapaciteit elektrolyzers

Effect	Toelichting beoordeling
Geen ingreep	Elektrolyser kan met grote zekerheid aangesloten worden op het 380kV-station waar ook wind op zee aangesloten wordt, zonder uitbreidingen binnen het station.
Beperkte ingreep	Elektrolyser kan naar verwachting aangesloten worden op het 380kV-station, maar hier is een uitbreiding voor nodig binnen het station.
Grote ingreep	Elektrolyzers kan naar verwachting niet aangesloten worden op het 380kV-station.

### 3.6.3 Impact op hoogspanningsverbindingen

Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat grootschalige elektrolyzers bij aansluitlocaties van wind op zee een nuttige systeemfunctie kunnen vervullen en kunnen zorgen voor een lagere belasting op hoogspanningsverbindingen. Dit komt doordat lokale overschotten dan direct omgezet worden in waterstof en niet doorgevoerd hoeven te worden. Dit is ook de reden dat er binnen

<sup>20</sup> Met uitzondering van de potentiële 700 MW aanlanding in Velsen vanuit HKW8.

pVAWOZ gezocht wordt naar geschikte locaties voor grootschalige elektrolyzers nabij aansluitlocaties.

Echter, de positieve impact van elektrolyzers op de belasting van de hoogspanningsverbinding verschilt per regio aangezien dit afhankelijk is van de overige elektriciteitsvraag en productie. Daarnaast kunnen elektrolyzers bij aansluitlocaties ook nieuwe knelpunten op 380kV-verbindingen veroorzaken, door inzet op momenten met weinig productie van wind op zee. Daarom beoordelen we de impact van elektrolyzers op de hoogspanningsverbindingen, om een inschatting te geven van het nut van elektrolyzers in de regio. Hierbij hanteren we de volgende beoordelingstabel.

Tabel 3-11 Beoordelingstabel impact hoogspanningsverbindingen elektrolyzers

Effect	Toelichting beoordeling
<b>Zeer positief</b>	Elektrolyse verlaagt belasting op hoogspanningsverbindingen fors en maakt extra elektrische aanlanding mogelijk. Elektrolyzers veroorzaken geen nieuwe knelpunten.
<b>Positief</b>	Elektrolyse verlaagt belasting door invoeding op hoogspanningsverbindingen fors, maar veroorzaakt ook hogere belasting door afname. Het netto-effect is wel positief.
<b>Neutraal</b>	Geen duidelijk positief effect elektrolyse op belasting hoogspanningsverbindingen.

In de doorrekeningen van TenneT worden elektrolyzers bij aanlandlocaties in elk van de scenario's en in elk van de aanlandconfiguraties meegenomen. Dit betekent dat het op basis van die doorrekeningen niet mogelijk is om de situatie met elektrolyzers te vergelijken met de situatie zonder elektrolyzers. Daarom baseren we deze beoordeling op expert judgement en de uitkomsten van de Startanalyse Systeemintegratie.

### 3.6.4 Impact op waterstofinfrastructuur

De geproduceerde waterstof van elektrolyzers op land moet afgevoerd worden met waterstofinfrastructuur. Eerst richting het nationale netwerk en vanaf het nationale netwerk richting afnemers of opslag in andere delen van Nederland. Bij dit effect beoordelen we of er naar verwachting voldoende transportcapaciteit is voor het afvoeren van de geproduceerde waterstof van elektrolyzers in verschillende regio's.

Tabel 3-12 Beoordelingstabel impact op waterstofinfrastructuur elektrolyzers

Effect	Toelichting beoordeling
<b>Geen ingreep</b>	Met weinig/geen ingrepen voldoende transportcapaciteit.
<b>Beperkte ingreep</b>	Enkele ingrepen nodig voor voldoende transportcapaciteit, of afhankelijk van andere ontwikkelingen (met name waterstofaanlanding).
<b>Grote ingreep</b>	Zeer grote ingrepen nodig voor voldoende transportcapaciteit.

### 3.6.5 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving. Dit is van belang voor het nut van elektrolyzers in een regio.

Enkele algemene technische uitdagingen bij het benutten van restwarmte van elektrolyzers zijn:

- De restwarmte is relatief beperkte temperatuur: 60 graden vergeleken met bijvoorbeeld 110 graden restwarmte uit de Rotterdamse Haven waarmee bijvoorbeeld de WarmtelinQ gevoed wordt. Om de temperatuur op te waarden naar hogere temperaturen is een

warmtepomp nodig die dan wel met een COP<sup>21</sup> van ongeveer 4 de warmte kan opwaarderen.

- De restwarmte is niet continu beschikbaar. Een elektrolyser heeft ca. 4.400 vollasturen (volgens de scenarioverkenningen van II3050). Dit betekent dat een elektrolyser ongeveer de helft van de tijd waterstof en dus ook warmte produceert. Grootschalige warmteopslag is nodig om warmte op te slaan, zodat altijd warmte geleverd kan worden. De huidige grootschalige opslagsystemen in Nederland zijn voldoende om ongeveer een halve dag aan warmte op te slaan. Langdurige grootschalige warmteopslag is dus nodig. De toepassing van grootschalige langdurige warmteopslag is nog in ontwikkeling.

Omwille van de bovenstaande technische redenen zal de toepassing van restwarmte uit elektrolyzers een stuk duurder zijn dan bijvoorbeeld industriële restwarmte op hogere temperaturen die jaarrond beschikbaar is. De economische potentie is afhankelijk van de beschikbaarheid van (alternatieve) warmtebronnen, momenteel nog onzeker, en dient verder onderzocht te worden.

Op basis van expert judgement maken we een inschatting of het mogelijk is om restwarmte van de elektrolyzers te benutten. Hiervoor is de nabijheid van warmtevraag, met name vanuit de gebouwde omgeving, bepalend. Voor de beoordeling hanteren we de volgende tabel.

Tabel 3-13 Beoordelingstabel mogelijkheid benutting restwarmte elektrolyzers

Effect	Toelichting beoordeling
Positief	Mogelijkheid hergebruik restwarmte waarschijnlijk
Neutraal	Mogelijkheid hergebruik restwarmte onzeker of beperkt
Negatief	Mogelijkheid hergebruik restwarmte onwaarschijnlijk

### 3.6.6 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse

In elk van de scenario's en aanlandconfiguraties wordt uitgegaan van ontwikkeling van elektrolyse. De totale hoeveelheid elektrolyse in Nederland verschilt tussen de twee energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie), maar is gelijk voor verschillende aanlandconfiguraties. De verdeling van de elektrolysecapaciteit over de verschillende regio's is wel afhankelijk van de aanlandconfiguratie: bij meer elektrische aanlanding in een regio wordt ook uitgegaan van meer elektrolyse (aangezien dan meer elektrolyse ook wenselijk is).

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> Coëfficiënt of performance, oftewel de verhouding tussen de geleverde warmte en het verbruik van elektriciteit.

<sup>22</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

Per regio geven we een overzicht hoe de bestaande plannen voor elektrolyzers zich verhouden tot de aannames in de scenario's.

#### **Inschatting bestaande plannen elektrolyzers**

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen.

### **3.7 Samenhang tussen de verschillende onderdelen**

Er worden separate beoordelingen uitgevoerd voor elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers. Maar er zit in werkelijkheid een wisselwerking tussen deze onderdelen. De plaatsing van elektrolyzers kan zowel positieve als negatieve effecten hebben op de elektrische aanlanding.

- Grootschalige elektrolyzers in de buurt van aansluitlocaties van wind op zee zullen separaat moeten worden aangesloten op een hoogspanningsstation, aangezien een directe koppeling tussen windparken op zee en elektrolyzers op land op dit moment niet toegestaan is. Vanwege de schaalgrootte zullen grootschalige elektrolyzers bij aansluitlocaties aangesloten worden op een 380kV-station. Dit heeft gevolgen voor de beschikbare aansluitcapaciteit en kan mogelijk de aansluiting van zowel de elektriciteit van wind op zee als de elektrolyser complexer maken.
- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen. In de doorgerekende toekomstscenario's nemen we een forse toename van de hoeveelheid elektrolyse aan. Deze elektrolyse, of andere flexibele vraag, zal ook noodzakelijk zijn om de elektrische aanlandingen te kunnen inpassen. Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken.
- Dezelfde regio's worden gebruikt voor grootschalige elektrolyzers op land, bij aansluitlocaties van elektrische aanlandingen, en waterstofaanlandingen. Al deze waterstof moet via dezelfde waterstofleidingen getransporteerd worden.

We gaan op de volgende manier om met de samenhang tussen de verschillende onderdelen (elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers) die beoordeeld worden:

- We beoordelen de verschillende onderdelen eerst separaat.
- We nemen aan dat er alleen grootschalige elektrolyzers bij aansluitlocaties geplaatst worden als er ook elektrische aanlandingen aangesloten worden. Dit nemen we dus als uitgangspunt bij de beoordeling van de elektrolyzers.

- We nemen bij de beoordeling van de elektrische aansluitingen aan dat elektrolyzers gerealiseerd worden bij de aansluitlocaties. De hoeveelheid elektrolyse bij de aansluitlocatie is bepaald door modellering van de netbeheerders in de energetische scenario's en is afhankelijk van de hoeveelheid elektrische aansluiting.
- Zowel waterstofaansluitingen als elektrolyzers op land hebben impact op het waterstofnetwerk op land. We beschouwen voor de regio's waar naar waterstofaansluiting gekeken wordt of beide ontwikkelingen mogelijk zijn.
- Voor elke regio stellen we overkoepelende conclusies op, waar we ingaan op de samenhang tussen elektrische aansluitingen, waterstofaansluitingen en elektrolyzers.

## 4 Regio-overstijgende resultaten

### 4.1 Elektrische aanlandingen

De elektrische aanlandingen van windparken op zee hebben niet alleen impact op de afvoerende 380kV-verbindingen vanuit de regio's, maar ook op de 380kV-verbindingen dieper landinwaarts. Het effect op het totale 380kV-net wordt daarom ook meegewogen, voor de gehele set aan tien elektrische aanlandingen.

We kijken hierbij naar de volgende aspecten:

- Algemene uitspraken over globale verdeling aanlanding in heel Nederland (bijvoorbeeld meer spreiding is gunstig, meer diep landinwaarts is gunstig).
- Afhankelijkheden tussen regio's. Heeft aanlanding wind op zee in de ene regio impact op de mogelijkheden in de andere regio?

#### **Doorgerekende configuraties zijn geen wensbeelden**

Er zijn vijf configuraties voor de elektrische aanlandingen doorgerekend om begrip te krijgen van de effecten van verschillende globale verdelingen, en van verschillende hoeveelheden aanlanding in specifieke regio's. De doorgerekende configuraties zijn zo opgesteld, dat ze zoveel mogelijk informatie op deze punten opleveren. Ze zijn expliciet geen wensbeelden. Er zijn ook andere configuraties mogelijk, bijvoorbeeld combinaties van de doorgerekende configuraties, die mogelijk nog gunstiger zijn.

De onderstaande figuren geven het totaal aantal HS-verbindingen waarvoor operationele ingrepen (redispatch) nodig zijn en het aantal verbindingen waar zware ingrepen (uitbreiding 380kV-verbindingen) nodig zijn, voor de vijf doorgerekende configuraties en beide energetische scenario's.

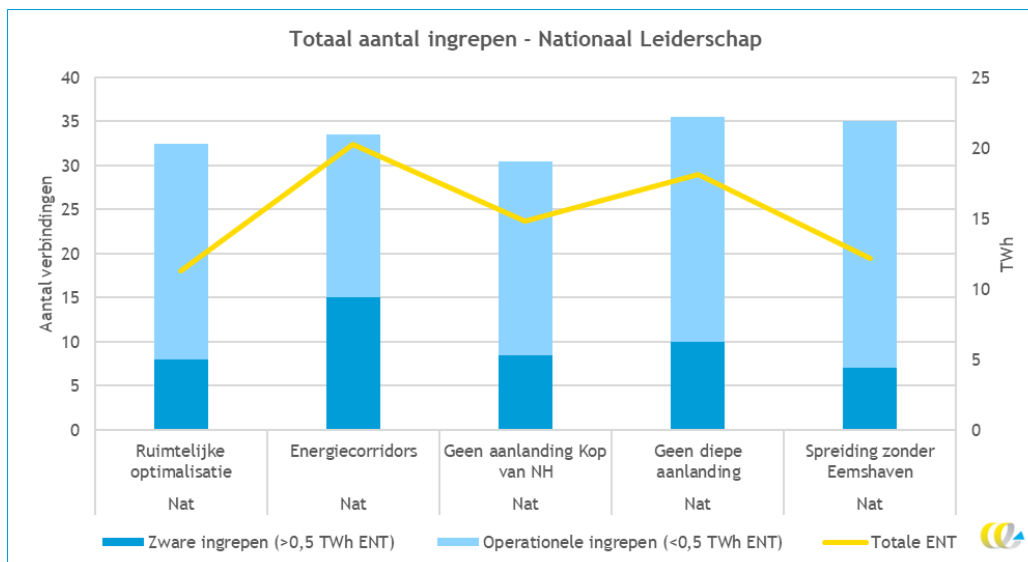
- De configuraties *Ruimtelijke optimalisatie* en *Spreiding zonder Eemshaven* gaan uit van spreiding van de elektrische aanlanding over de verschillende regio's.
- De configuratie *Energie Corridors* daarentegen gaat uit van clustering van de 10 elektrische aanlandingen in 3 regio's (de Kop van Noord-Holland, Noord-Nederland en Limburg).
- Bij de configuraties *Geen aanlanding Kop van NH* en *Geen diepe aanlanding* wordt onderzocht wat de effecten zijn als specifieke regio's minimaal benut worden.

De exacte aannames voor de verdeling van de aanlanding over de verschillende regio's voor deze configuraties is te vinden in bijlage A.

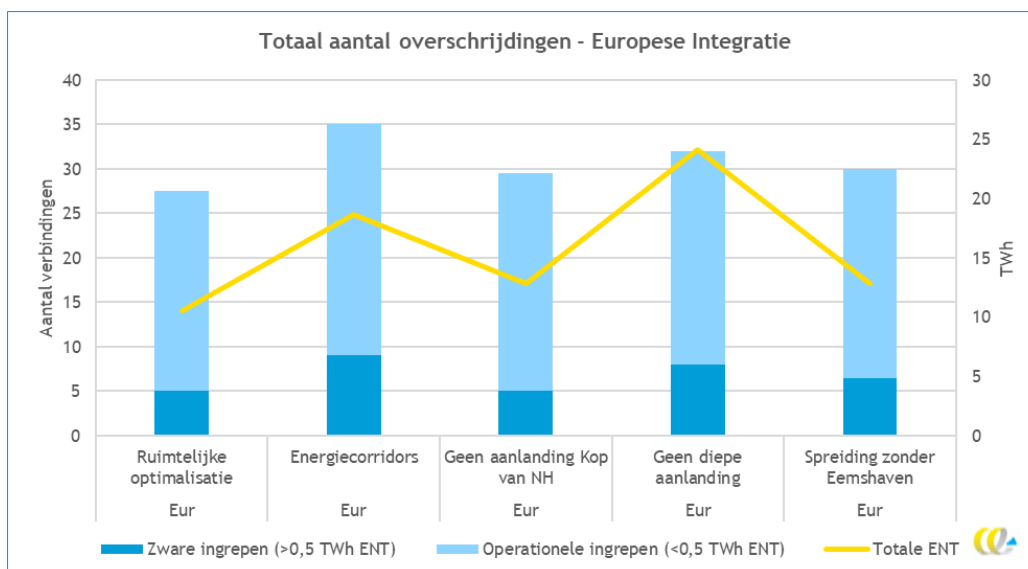
#### **Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid**

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).



Figuur 4-1 Aantal ingrepen 380kV-verbindingen en Energy Not Transported (ENT) bij vijf doorgerekende configuraties, scenario Nationaal Leiderschap



Figuur 4-2 Aantal ingrepen 380kV-verbindingen en Energy Not Transported (ENT) bij vijf doorgerekende configuraties, scenario Europese Integratie

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Spreiding van de aanlanding over alle regio's leidt tot beduidend minder ingrepen bij 380kV-verbindingen dan clustering op enkele locaties, en heeft daarom vanuit het perspectief van systeemintegratie de voorkeur. Spreiding lijkt gunstiger uit te pakken om de volgende twee redenen:
  - Elke regio heeft een maximale hoeveelheid aanlanding die mogelijk is voordat ingrepen bij de 380kV-verbindingen in de regio noodzakelijk zijn. Bij spreiding is het mogelijk om zoveel mogelijk binnen die grenzen te blijven, bij clustering niet.
  - Clustering zorgt er ook voor dat er grotere ingrepen nodig zijn op verbindingen landinwaarts.
- Het uitsluiten van bepaalde regio's (*Geen aanlanding Kop van NH* en *Geen diepe aanlanding*) leidt tot meer ingrepen en is daarmee vanuit het perspectief van systeemintegratie niet

wenselijk. Bij het uitsluiten van de Kop van Noord-Holland of diepe aanlanding zijn extra aanlandingen nodig in andere regio's, waardoor daar zwaardere ingrepen nodig zijn. Daarnaast heeft diepe aanlanding een gunstig effect op de belasting op het 380kV-net (zie paragraaf 10.2.3).

- Er is samenhang tussen aanlanding in de Kop van Noord-Holland en Noord-Holland Zuid, aangezien overschotten vanuit deze twee regio's via dezelfde 380kV-verbindingen richting de rest van Nederland getransporteerd worden. Echter, bij de doorgerekende configuraties (met maximaal 8 GW in deze twee regio's samen) zijn geen grote ingrepen nodig. Tot 8 GW in deze regio's samen hoeft dus geen rekening gehouden te worden met deze interactie. Voor meer dan 8 GW in de regio's samen moet verder gekeken worden naar de gezamenlijke effecten.
- Er is een mogelijke afhankelijkheid tussen de mogelijkheden voor aanlanding in Zuid-Holland en Zeeland, aangezien (een deel van) de overschotten vanuit deze regio's samenkomen op 380kV-verbindingen in Noord-Brabant. Uit de doorrekeningen volgt echter dat met name aanlanding in Noord-Brabant en Limburg bepalend is voor het aantal ingrepen dat nodig is bij de 380kV-verbindingen in Noord-Brabant, en niet het aantal aanlandingen in Zuid-Holland en Zeeland. Dit is dus niet doorslaggevend voor de mogelijkheden voor aanlanding in deze regio's.
- Er is een afhankelijkheid tussen de mogelijkheden voor aanlanding in Noord-Holland Zuid en Zuid-Holland, aangezien (een deel van) de overschotten vanuit deze regio's samenkomen op 380kV-verbindingen dieper landinwaarts. Dit levert een beperking op voor aanlanding in deze regio's als de Netuitbreiding in de Randstad niet tijdig gerealiseerd wordt (zie paragraaf 5.5).
- Er zijn in het scenario Nationaal Leiderschap meer zware ingrepen, doordat er in dit scenario meer elektrificatie zit. Maar de uitkomsten zitten relatief dicht bij elkaar en de verschillen tussen de configuraties blijven vrijwel gelijk. Dit betekent dat de overige ontwikkelingen van het energiesysteem, zoals kernenergie en elektrificatie van de industrie, op de inpassing van elektrische aanlanding wel impact hebben op de inpassing van wind op zee. Maar dat dit niet leidt tot andere keuzes wat betreft de nationale verdeling van de aanlandingen. Deze overige ontwikkelingen hebben wel impact op wat inpasbaar is binnen de regio's.

## 4.2 Waterstofaanlandingen

Er zijn geen regio-overstijgende resultaten te benoemen met betrekking tot waterstofaanlanding en de impact op de waterstofinfrastructuur. De impact per regio is hiervoor doorslaggevend.

Bij de analyse van de impact van waterstofaanlanding op het waterstofnetwerk voor 2040 is steeds uitgegaan van een enkele buisleiding voor aanlanding van waterstof vanuit zee van 7 GW waterstof<sup>23</sup>. Bij elke regio, behalve Zuid-Holland, zijn er bij een enkele buisleiding voor aanlanding van waterstof geen ingrepen nodig aan het Waterstofnetwerk Nederland. Bij een verdeling van de aanlanding van waterstof over twee verschillende regio's is de impact op het Waterstofnetwerk Nederland nog kleiner. Dit betekent dat het tot 2040 voor de impact op de waterstofinfrastructuur op land beperkt uitmaakt of één of twee locaties gekozen worden, behalve als voor aanlanding in Zuid-Holland gekozen wordt.

---

<sup>23</sup> Dit is de energiewaarde van de geproduceerde waterstof. Dit komt overeen met 9 GWe opgesteld elektrolysevermogen.

Bij de beoordeling is gekeken naar de effecten van waterstofaanlanding tot 2040. Richting 2050 zal mogelijk meer waterstof aan land gebracht worden met dezelfde buisleidingen en dan zal het effect op het waterstofnetwerk groter zijn, dus het is noodzakelijk om met de keuze voor 2040 rekening te houden met de benutting van deze buisleiding in 2050. Dit wordt behandeld bij het rapport *Toekomstvastheid* (bijlage G) en in hoofdstuk 13 van dit rapport.

## 5 Gevoeligheidsanalyses

De uitkomsten van de doorrekeningen van TenneT en Gasunie geven veel inzicht, maar zijn alleen geldig bij de uitgangspunten van de energetische scenario's en de gekozen aanlandconfiguraties. Er zijn echter ook ontwikkelingen denkbaar die buiten deze uitgangspunten vallen. Hiervoor zijn verschillen- en gevoeligheidsanalyses uitgevoerd (zie paragraaf 1.3.3).

Voor ontwikkelingen die onvoldoende meegenomen zijn in de energetische scenario's zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Hierbij zijn de effecten van specifieke ontwikkelingen op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem in kaart gebracht. De resultaten van deze analyses worden gebruikt om de beoordeling Systeemintegratie te verrijken en daarbij meer inzicht te geven in onzekerheden en afhankelijkheden.

Hieronder bespreken we de resultaten van de gevoeligheidsanalyses. De bevindingen van de gevoeligheidsanalyses worden ook meegenomen bij de resultaten van de regio's (hoofdstuk 6 tot en met 11). Een uitgebreide beschrijving van de methodiek en resultaten van deze analyses is te vinden in Bijlage B.

### 5.1 Nationale systeemkeuzes

Binnen de beoordeling systeemintegratie van het Programma VAWOZ 2031-2040 ligt de focus op de optimale inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur. Maar bij systeemintegratie van wind op zee zijn ook overkoepelende systeemkeuzes rondom wind op zee van belang. Deze systeemkeuzes worden in andere beleidsdocumenten, zoals het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN), het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) behandeld. In paragraaf 2.2 gaan we in op de afwegingen bij deze keuzes. De nationale systeemkeuzes hebben wel daarnaast effect op de inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur op land, wat wel expliciet binnen de scope van pVAWOZ valt. Daar gaan we in deze paragraaf op in.

In deze gevoeligheidsanalyse is gekeken naar de effecten van verschillende systeemkeuzes:

- **Verhouding elektrische verbindingen en waterstofverbindingen.** Er kunnen grote hoeveelheden elektriciteit geproduceerd worden met windparken op zee. De keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040. In het Programma VAWOZ wordt uitgegaan van circa 10 elektrische verbindingen (circa 20 GW) en één of twee waterstofverbindingen voor de periode 2031-2040.
- **Hybride aansluitingen of radiale aansluitingen.** Na 2030 is het voor windgebied 6/7 een mogelijkheid om hybride aansluitingen te realiseren waarbij meerdere kabels op zee samenkomen bij een energiehub waar vervolgens elektrolyse toegepast wordt. Vanaf deze energiehub wordt vervolgens elektriciteit en waterstof richting de kust getransporteerd. Bij dit concept wordt ook wel gesproken van hybride aansluitingen.
- **Overplanting: meer windmolens op dezelfde kabel.** In dit geval wordt het windvermogen ontsloten met minder kabels (bijvoorbeeld 3 GW windmolens op 2 GW kabels).

### 5.1.1 Verhouding elektrische verbindingen en waterstofverbindingen

#### Onderzoekopgave pVAWOZ volledig elektrisch aanlanden

TenneT heeft een integrale netdoorrekening gemaakt om de effecten op het HS-net bij 15 elektrische aanlandingen van 2 GW na realisatie van de routekaart windenergie op zee 21 GW, en in totaal daarmee 50 GW elektrische aanlanding, in te schatten. Deze gevoeligheidsanalyse is uitgewerkt voor het scenario Nationaal Leiderschap.

Bij meer elektrische aanlanding verandert het hele energiesysteem, aangezien het energiesysteem in balans moet zijn en het extra aanbod van elektriciteit ook ergens benut moet worden (of curtailment toegepast moet worden). Daarom is een nieuw energetisch scenario opgesteld. De vraag naar elektriciteit en waterstof en de productie van overige energiebronnen is gelijk gehouden ten opzichte van het scenario met 10 elektrische aanlandingen. Maar er is wel een nieuwe inschatting gemaakt van de inzet van flexibele bronnen, zoals flexibele vraag van elektrolyzers op land, import/export, opslag en curtailment. Hiervoor is de modellering van ii3050 gebruikt.

Bij de doorrekening van de 15 elektrische aanlandingen gaan we uit van een, vanuit het perspectief van systeemintegratie, gunstige verdeling aangezien dit naar verwachting noodzakelijk is om 15 elektrische verbindingen te kunnen realiseren. Daarbij is gekozen voor een configuratie die naar verwachting tot zo min mogelijk knelpunten op het hoogspanningsnet op land leidt. De doorgerekende configuratie lijkt op de configuratie Ruimtelijke Optimalisatie, maar dan met 5 extra elektrische aanlandingen. Daarom vergelijken we de resultaten van de doorrekening met 15 elektrische aanlandingen met de resultaten van de configuratie Ruimtelijke Optimalisatie.

De belangrijkste conclusies over de impact van het realiseren van extra elektrische aanlanding zijn:

- Bij 15 elektrische aanlandingen zijn bij extra 380kV-verbindingen grote ingrepen noodzakelijk. Dit heeft twee oorzaken:
  - Elke regio heeft een maximale hoeveelheid aanlanding die mogelijk is voordat ingrepen bij de 380kV-verbindingen in de regio noodzakelijk zijn. Bij 15 elektrische aanlandingen is het niet mogelijk om binnen die grenzen te blijven voor alle regio's.
  - Er is ook meer belasting op de 380kV-verbindingen in het binnenland, onder meer door meer export.
- We gaan uit van een, vanuit systeemintegratie, 'optimale' verdeling van de elektrische aanlandingen over de verschillende regio's. Bij een minder optimale verdeling zullen nog meer ingrepen nodig zijn aan de HS-verbindingen nodig zijn bij 15 elektrische verbindingen.
- In de doorrekeningen is aangenomen dat extra elektrische aanlanding leidt tot extra flexibele vraag naar elektriciteit, ook binnen de regio's. Dit dempt een deel van de effecten van het extra aanbod van elektriciteit. Dit strookt met hoe we verwachten dat dit in de praktijk ook zal uitpakken.
- Bij 15 elektrische aanlandingen is ook meer aansluitcapaciteit noodzakelijk bij HS-stations. Naar verwachting is er voldoende capaciteit beschikbaar bij alle stations om (deels met uitbreidingen binnen het station) 15 elektrische aanlandingen aan te kunnen sluiten.

**Minder elektrische aanlanding, of minder wind op zee in totaal**

Er is geen separate netdoorrekening gemaakt door TenneT en/of Gasunie voor de situatie met minder wind op zee in 2040. Hieronder bespreken we wel kwalitatief de effecten hiervan:

- Als er minder dan 50 GW wind op zee gerealiseerd wordt, dan leidt dit tot minder elektrische aanlanding en/of minder waterstofaanlanding. De exacte impact op de energie-infrastructuur is afhankelijk van of van de verhouding elektrische aanlanding en waterstofaanlanding.
- Bij minder elektrische aanlanding is er minder impact op de HS-verbindingen. Dit betekent dat er mogelijk minder ingrepen nodig zijn en dat het minder impact heeft als aanlanding in bepaalde regio's niet mogelijk is, in vergelijking met 10 elektrische aanlandingen. Bij 10 elektrische aanlandingen leidt het uitsluiten van bepaalde regio's tot extra ingrepen aan de HS-verbindingen (zie paragraaf 4.1).
- Minder elektrische aanlanding leidt tot minder export en mogelijk minder elektriciteitsvraag van flexibele bronnen. Dit kan komen doordat er minder flexibele bronnen, zoals elektrolyzers, gerealiseerd worden of doordat deze bronnen minder draaiuren maken. Als er minder flexibele vraag is, dan kan dit ervoor zorgen dat minder elektrische aanlandingen inpasbaar zijn per regio (meer hierover in paragraaf 5.2)
- Bij minder waterstofaanlanding is er ook minder impact op het waterstofnetwerk. Bij minder waterstofaanlanding is wel meer waterstofimport nodig. Dit zal naar verwachting op locaties gerealiseerd worden die ook onderzocht worden voor waterstofaanlanding, wat een deel van het effect van minder waterstofaanlanding opheft.
- Bij minder dan 50 GW wind op zee zijn er in totaal dus naar verwachting minder ingrepen nodig aan de energie-infrastructuur. Maar dan is er uiteraard ook minder hernieuwbare energie beschikbaar, waardoor de CO<sub>2</sub>-reductiedoelen lastiger te halen zijn. In paragraaf 2.2.1 gaan we in op de impact van het realiseren van minder elektrische aanlanding of minder wind op zee in totaal op de nationale systeembalans en de benutting van de windenergie.

### 5.1.2 Hybride aansluitingen en overplanting

In gevoeligheidsanalyses is ook een inschatting gemaakt van de effecten van hybride aansluitingen en overplanting. Hierbij ligt de primaire focus op de impact van deze nationale systeemkeuzes op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem op land, en dan concreet de vraag of deze keuzes effect hebben op de hoeveelheid aanlanding die per regio inpasbaar zijn. De belangrijkste conclusies daarvan zijn:

- Hybride aansluitingen en overplanting hebben invloed op de hoeveelheid elektriciteit die per kabel vanaf zee naar land getransporteerd wordt, wat effect heeft op het transport van elektriciteit via de HS-verbindingen rondom de aansluitlocaties, en daarmee potentieel op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast kan worden. We verwachten echter dat de impact op het aantal elektrische verbindingen dat ingepast kan worden per regio beperkt is, aangezien er vooral meer elektriciteit naar land gebracht wordt op uren met weinig productie van wind op zee en het piekvermogen voor invoeding gelijk blijft. Het is wel mogelijk dat er iets meer uren met overschrijding ontstaan, bijvoorbeeld op uren met relatief weinig wind op de Noordzee maar ook weinig (flexibele) vraag.
- Zowel hybride aansluitingen als overplanting kan ervoor zorgen dat minder elektrische verbindingen gerealiseerd en ingepast hoeven te worden in heel Nederland. In dat geval wordt de opgave voor inpassing van wind op zee in het hoogspanningsnet op land minder uitdagend.
- Dit betekent dat deze systeemkeuzes ervoor kunnen zorgen dat wind op zee makkelijker ingepast kan worden, aangezien het effect op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast naar verwachting beperkt is en er in totaal minder elektrische verbindingen nodig zijn.

Zo kan potentieel een groter vermogen aan windmolens ingepast worden, zonder forse uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur.

Naast de impact van de systeemkeuzes op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem op land hebben we ook een inschatting gemaakt van de impact van de systeemkeuzes op de nationale balans van vraag en aanbod en op de benutting van de windenergie. Hier gaan we in paragraaf 2.2.2 op in.

## 5.2 Ontwikkeling elektrolyse en overige flexibiliteit

Richting 2040 zal inzet van flexibiliteitsbronnen, zoals batterijen en elektrolyzers, noodzakelijk zijn voor het balanceren van vraag en aanbod van het energiesysteem en kan bijdragen efficiënte benutting van de windenergie. Maar inzet van flexibiliteitsbronnen heeft ook impact op de inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur op land, door extra stroomafname te genereren op momenten met lokale overschotten van wind op zee. Verschillende bronnen van flexibiliteit kunnen bijdragen aan de inpassing van wind op zee, maar elektrolyzers dragen hier naar verwachting het meeste aan bij. Ook curtailment van wind op zee draagt bij aan het integreren van windstroom. Inzet van batterijen kan wat bijdragen aan lokale benutting en daarmee aan inpassing van wind op zee, maar de impact is beperkt. Batterijen zijn wel nodig voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit op nationaal niveau, maar vanuit het perspectief van integratie elektriciteit van wind op zee is het niet persé nodig dat dit op de aansluitlocaties van wind op zee gebeurt.

De hoeveelheid elektrolyse die gerealiseerd wordt op deze locaties heeft impact op de inpassing van wind op zee, en op de hoeveelheid (elektrische) aanlanding van wind op zee die mogelijk is per regio. Een elektrolyser kan voor een positieve bijdrage zorgen, door de belasting op hoogspanningsverbindingen te verlagen door elektriciteit te gebruiken voor de conversie naar waterstof. Hierdoor kan eventueel extra elektrische aanlanding gerealiseerd worden of kunnen investeringen in hoogspanningsverbindingen uitgespaard worden.

In de doorgerekende scenario's, die de basis vormen voor de beoordeling systeemintegratie, zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling rondom elektrolyse (hoeveelheid, wijze van inzet en locaties). De onderstaande tabel geeft een overzicht hoe de aannames over de ontwikkeling van elektrolyse zich verhouden tot de huidige plannen.

Tabel 5-1 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Kop van Noord-Holland	0 MW	400 – 1.750 MW <sup>24</sup>	100 – 900 MW
Noord-Holland Zuid	0 – 600 MW	650 – 700 MW	400 MW
Zuid-Holland	200 – 2.100 MW	3.000 – 5.500 MW	1.900 – 3.200 MW
Zeeland	0 – 900 MW	2.500 – 3.500 MW	1.450 – 1.900 MW
Noord Nederland	0 – 1.000 MW	1.000 – 3.900 MW	500 – 2.000 MW
Moerdijk/Geertruidenberg	0 MW	700 – 1.900 MW	400 – 1.100 MW
Totaal van regio's	200 – 4.500 MW		

#### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen.

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij realisatie van de bovengrens van de huidige plannen komt het vermogen in de meeste regio's al in de buurt (bij de onderkant van de bandbreedte) van het scenario Europese Integratie. De huidige plannen lopen met name tot 2030 en het scenario gaat over de situatie in 2040, wat impliceert dat de aannames in dit scenario haalbaar lijken bij realisatie van de bestaande plannen. Echter, de huidige plannen zijn erg onzeker omdat er nog vrijwel geen definitieve investeringsbeslissingen genomen zijn vanwege een onzekere business case.
- Voor de vermogens aan elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap is nog een forse toename nodig van de elektrolysecapaciteit bovenop de bestaande plannen.

Bovenstaande analyse laat zien dat het geen zekerheid is dat de hoeveelheid elektrolyse die aangenomen is in de scenario's ook daadwerkelijk gerealiseerd wordt. Aan de anderen kant zijn er ook industrieclusters die een ambitie voor de ontwikkeling van elektrolyse hebben die hoger ligt dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. De vraag is wat de impact van de ontwikkeling van elektrolyse, en andere flexibele vraag, is op het aantal elektrische verbindingen dat inpasbaar is per regio en of ontwikkeling van flexibele vraag randvoorwaardelijk is.

De belangrijkste conclusies over de impact van de ontwikkeling van flexibele vraag (en met name elektrolyse) op de mogelijkheden voor aanlanding zijn:

- Er zijn twee scenario's doorgerekend (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie), waarbij het scenario Europese Integratie van een stuk minder elektriciteitsvraag en elektrolyse uitgaat. In Zuid-Holland lijkt in het scenario Nationaal Leiderschap één elektrische aanlanding ingepast te kunnen worden dan in het scenario Europese Integratie, door de grotere elektriciteitsvraag en elektrolysecapaciteit. In de andere regio's is het aantal elektrische aanlandingen dat ingepast kan worden in beide scenario's gelijk.

<sup>24</sup> Dit is bij minimaal 1 elektrische verbinding. Zonder elektrische verbinding in Kop van Noord-Holland is grootschalige elektrolyse vanuit systeemperspectief niet nuttig.

- Het is in de praktijk mogelijk dat nog minder elektrolyse gerealiseerd wordt dan in het scenario Europese Integratie. In dat geval zijn ook in andere regio's één of twee elektrische verbindingen minder inpasbaar, maar:
  - Als elektrolyse niet van de grond komt dan is er ook een stuk minder elektriciteitsvraag. Een scenario met 50 GW wind op zee in 2040 met (vrijwel) geen elektrolyse en overige flexibele bronnen (en de verwachte vraagontwikkeling richting 2040) lijkt vanuit systeemintegratie gezien niet efficiënt.
  - Ook andere bronnen van (flexibele) elektriciteitsvraag kunnen bijdragen aan de inpassing van wind op zee, als de ontwikkeling van elektrolyse achterblijft.
  - Dit heeft ook impact voor de invulling van de waterstofvraag. Daardoor zijn meer andere bronnen van waterstof, zoals import, nodig om aan de waterstofvraag te voorzien.
- In verschillende CES'sen is voor de ontwikkeling van elektrolyse een hogere ambitie opgenomen dan de bovengrens van de gehanteerde scenario's. In dat geval zouden mogelijk meer elektrische verbinding ingepast kunnen worden. Er is dan echter wel een forse toename en versnelling van de uitrol van elektrolyse nodig, terwijl de huidige (concrete) plannen juist achterblijven bij de aannames in de scenario's.
- Vanwege bovenstaande punten gaan we voor de beoordeling van Systeemintegratie uit van de ontwikkeling van flexibiliteit in de twee doorgerekende scenario's. Er zit al een flink verschil tussen de scenario's, wat betekent dat we al uitgaan van een flinke bandbreedte.
- De impact van elektrolyzers (en andere bronnen van flexibiliteit) op de inpassing van wind op zee is afhankelijk van de wijze waarop deze bronnen ingezet worden. We verwachten dat de inzet sterk gecorreleerd zal zijn met de invoeding van wind op zee (vanwege marktprikkels en eisen vanuit de REDIII). Wel kunnen er momenten zijn waarop de inzet van elektrolyzers afwijkt van invoeding van wind op zee:
  - Als er veel invoeding van wind op zee is, maar de elektriciteitsprijzen hoog zijn (door hoge vraag). Dan draaien elektrolyzers niet, wat tot knelpunten op het hoogspanningsnet door afvoer van elektriciteit vanaf aansluitlocaties kan leiden. Middels redispatch kan gezorgd worden dat elektrolyzers (tegen een vergoeding) toch draaien op deze uren.
  - Als er weinig invoeding van wind op zee is, maar de elektriciteitsprijzen laag zijn (door veel zon). Dan draaien elektrolyzers wel, wat tot knelpunten op het hoogspanningsnet door aanvoer van elektriciteit richting aansluitlocaties kan leiden. Met alternatieve transportrechten voor elektrolyzers kan dit risico gemitigeerd worden.

### 5.3 Ontwikkeling industrieclusters

In de scenario's die gehanteerd worden voor de beoordeling Systeemintegratie zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie in de grote industrieclusters. In de nieuwste Cluster Energie Strategieën (CES 3.0) hebben de grote industrieclusters ook een inschatting hiervan gemaakt, op basis van de (verduurzamings)plannen van individuele bedrijven<sup>25</sup>. In deze analyse hebben we onderzocht of de beelden over de ontwikkeling van vraag en aanbod in de CES in lijn zijn met de gehanteerde scenario's en wat de effecten zijn van eventuele verschillen op de inpassing van wind op zee.

De belangrijkste conclusies over verschillen in aannames over vraagontwikkeling tussen de CES 3.0 en de doorgerekende scenario's zijn:

- **Noord-Nederland.** De elektrolysecapaciteit die benoemd wordt in het rapport van de CES Noord-Nederland ligt echter een stuk hoger dan de bandbreedte van de doorgerekende

<sup>25</sup> Voor een groot deel van de verduurzamingsontwikkelingen die meegenomen worden in de CES is door de bedrijven nog geen definitieve investeringsbeslissing genomen.

scenario's, namelijk 1,7 GW hoger dan de bovengrens. Als er inderdaad een stuk meer elektrolyse gerealiseerd wordt, dan heeft dat de volgende effecten:

- Door de extra vraag naar elektriciteit van de elektrolyzers kan mogelijk een extra elektrische verbinding ingepast worden.
- Het hogere aanbod van waterstof leidt ertoe dat meer waterstof afgevoerd moet worden via Waterstofnetwerk Nederland. Dit lijkt te passen binnen de capaciteit van het geplande netwerk.
- **Noordzeekanaalgebied.** Het grootste verschil tussen de geprognoseerde plannen van de CES en de doorgerekende scenario's ligt in de elektriciteitsvraag. In de CES wordt uitgegaan van 5 TWh meer elektriciteitsvraag uit industrie en van elektrolyse. Dit komt overeen met ongeveer 0,6 GW extra vraag. Hierdoor kan iets meer aanbod van wind op zee lokaal benut worden en kan er mogelijk iets meer wind op zee aanlanden, maar of dit ertoe leidt dat een extra elektrische verbinding (à 2 GW) ingepast kan worden, is onzeker.
- **Rotterdam.** De geprognoseerde waterstofvraag van de CES 3.0 valt lager uit dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Indien de lokale vraag daadwerkelijk lager uitvalt, zal waterstofaanlanding of lokaal opgewekte waterstof meer doorgevoerd moeten worden naar de rest van Nederland en worden de knelpunten op het waterstofnetwerk bij waterstofaanlanding mogelijk groter. Dit heeft geen impact op de beoordeling (is al negatief vanwege uitbreidingen die nodig zijn in doorgerekende scenario's).
- **Zeeland.** Een groot verschil in aannames is de ontwikkeling van kernenergie. In een losse gevoeligheidsanalyse gaan we in op de effecten hiervan (zie paragraaf 5.4). Daarnaast ligt de elektrolysecapaciteit die benoemd wordt in het rapport van de CES SDR licht echter een stuk hoger dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, namelijk 1,2 GW hoger dan de bovengrens.
  - Door de extra vraag naar elektriciteit van de elektrolyzers kan mogelijk een extra elektrische verbinding ingepast worden.
  - Het hogere aanbod van waterstof leidt ertoe dat meer waterstof afgevoerd moet worden via Waterstofnetwerk Nederland. Dit lijkt te passen binnen de capaciteit van het geplande netwerk.
- **Chemelot.** De plannen van Chemelot zijn van belang voor de onderzochte diepe aanlanding wind op zee in Limburg. Daarom is ook naar de CES plannen van deze regio gekeken. Er zijn wat verschillen tussen de geprognoseerde plannen vanuit de CES en in de doorgerekende scenario's van pVAWOZ, maar dit komt vooral door de grote bandbreedte in de prognoses voor 2040 binnen de CES (door gebrek aan kwantificering en aanscherping). Daarom kan op dit moment geen zinnige uitspraak gedaan worden over effecten van de CES (en verschillen met de doorgerekende scenario's) op de inpassing van wind op zee.

#### 5.4 Scenario's met meer kernenergie<sup>26</sup>

Het kabinet heeft in het coalitieakkoord van Kabinet Rutte IV het voornemen uitgesproken om kernenergie een grotere rol te geven in de Nederlandse energiemix. Dit omvat ten eerste de verlenging van de bedrijfsduur van de bestaande kerncentrale Borssele en de ontwikkeling van twee nieuwe kerncentrales. In het regeerakkoord van het kabinet Schoof is de bouw van in totaal vier nieuwe kerncentrales aangekondigd.

---

<sup>26</sup> Er is alleen gekeken naar de afhankelijkheid van realisatie van grote kerncentrales. SMR's zijn niet meegenomen in de analyses.

In de scenario's die de basis vormen voor de beoordeling Systeemintegratie, de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, wordt uitgegaan van de ontwikkeling van nieuwe kerncentrales. Maar de omvang van de ontwikkeling van kernenergie komt niet overeen met de onderzoeksplannen. Daarnaast wordt in deze scenario's uitgegaan van een vaste ruimtelijke verdeling, terwijl er bij de onderzoeksplannen van de nieuwe kerncentrales gekeken wordt naar verschillende alternatieven. Daarom zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd door TenneT, met nieuwe scenario's die in lijn zijn met de bestaande onderzoeksplannen voor kernenergie en met verschillende ruimtelijke verdelingen van die kerncentrales. Hierbij is gekeken naar de vier potentiële locaties voor deze nieuwe kerncentrales bekeken: Borssele, Terneuzen, Maasvlakte en Eemshaven<sup>27</sup>.

Tabel 5-2 Uitgangspunten kernenergie in verschillende scenario's

	Totaal vermogen kernenergie	In Zeeland	In Rotterdam	In Eemshaven
Nationale Drijfveer	1,5 GW	1,1 GW	0,4 GW	0 GW
Europese Integratie	4,0 GW	2,0 GW	2,0 GW	0 GW
Gevoeligheidsanalyse – 2 nieuwe kerncentrales	3,7 GW	Verschillende varianten		
Gevoeligheidsanalyse – 4 nieuwe kerncentrales <sup>28</sup>	6,9 GW	Verschillende varianten		

De realisatie van grote kerncentrales heeft een wisselwerking met de aanlanding van wind op zee die in die regio mogelijk is. Dit komt doordat grote kerncentrales (bij 2 centrales gaat het om circa 3,2 GW) zorgen dat lokaal meer elektriciteit geproduceerd wordt. Dit zorgt ervoor dat meer stroom afgevoerd moet worden, wat in elke van de regio's waarvoor gekeken wordt naar grote kerncentrales (Zeeland, Zuid-Holland en Noord-Nederland) al de grootste uitdaging is voor de inpassing van meer wind op zee. Daardoor zorgt kernenergie ervoor dat de belasting op de 380kV-verbindingen door afvoer van elektriciteit hoger wordt, en dat in principe minder elektrische aanlandingen van wind op zee ingepast kunnen worden voordat grote ingrepen nodig zijn.

De conclusies van de gevoeligheidsanalyses zijn:

- In elke regio zijn minder elektrische aanlandingen inpasbaar bij realisatie van twee grote kerncentrales:
  - In Zeeland is 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep in plaats van 2. Daarvoor maakt het niet uit of de kerncentrales is Borssele of Terneuzen komen.
  - In Zuid-Holland is 0 of 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in plaats van 1 tot 3.
  - In de Eemshaven is 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in plaats van 2 tot 3.
- In het scenario Nationaal Leiderschap heeft het plaatsen van twee grote kerncentrales een groter effect op het aantal elektrische aanlandingen dat zonder grote ingreep ingepast kan worden dan in het scenario Europese Integratie. Dit komt naar verwachting doordat kerncentrales in dit scenario meer draaiuren maken en er daarmee meer overlap is tussen de inzet van kerncentrales en uren met veel productie van wind op zee.
- Bij het scenario met in totaal vier grote kerncentrales, met ook hier twee centrales per regio, zijn de effecten voor de regio's vrijwel hetzelfde als in het scenario met in twee grote kerncentrales.

<sup>27</sup> Dit zijn de locaties die onderzocht worden in de projectprocedure voor de eerste twee kerncentrales.

<sup>28</sup> In de [Voortgangsbrief nieuwbouw kernenergie mei 2025](#) wordt benoemd dat de eerste twee kerncentrales pas eind jaren '30 gereed kunnen zijn. Daarmee lijkt dit scenario met vier centrales in 2040 zeer uitdagend.

## 5.5 Scenario's zonder netuitbreiding Randstad

In de analyses wordt uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker.

Om in te schatten wat de impact van vertraging of het niet realiseren van deze verbinding is op de inpassing van wind op zee, heeft TenneT extra doorrekeningen gedaan waar deze uitbreiding aan het hoogspanningsnet niet meegenomen wordt. Dit heeft impact op de mogelijkheden voor aanlanding in de Kop van Noord-Holland, Noord-Holland Zuid en Zuid-Holland. Voor de mogelijkheden voor aanlanding in de overige regio's heeft dit geen impact.

Deze doorrekeningen zijn gedaan voor twee configuraties (Ruimtelijke optimalisatie en Spreiding zonder Eemshaven), en voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie). In totaal gaat het dus om vier doorrekeningen.

Uit de doorrekening van de vier scenario's zonder de netuitbreiding in de Randstad volgt dat dan in zowel Noord- als Zuid-Holland elektrische aanlanding uitdagend wordt. Er lijkt in dat geval nog één elektrische aanlanding mogelijk in de kop van Noord-Holland en één elektrische aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland.

## 5.6 Aanlanding in Lelystad

In pVAWOZ wordt op dit moment niet naar Lelystad als potentiële aansluitlocatie voor wind op zee voor de periode 2031-2040 gekeken. Er is echter wel inzicht gewenst over de mogelijkheid en wenselijkheid van aanlanding in Lelystad, vanuit systeemintegratie. Om hier antwoord op te geven heeft TenneT aanvullende doorrekeningen gedaan.

Daarbij zijn twee variaties doorgerekend op de aanlandconfiguratie Ruimtelijke optimalisatie: één waarbij een aanlanding van 2 GW in Lelystad gerealiseerd wordt in plaats van bij de Eemshaven en één waarbij een aanlanding van 2 GW in Lelystad gerealiseerd wordt in plaats van Noord-Holland Noord. De elektrische aanlanding van wind op zee bij de configuratie Ruimtelijke optimalisatie en de twee varianten met aanlanding in Lelystad is weergegeven in Beide variaties zijn doorgerekend voor zowel het scenario Nationaal Leiderschap als het scenario Europese Integratie.

Uit de netdoorrekeningen van de gevoeligheidsanalyses voor aanlanding in Flevoland kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Aanlanding in Lelystad in plaats van de Eemshaven heeft weinig impact op de knelpunten en benodigde ingrepen aan de HS-verbindingen. Dit komt ook doordat deze analyse gedaan is voor een configuratie met weinig aanlanding in de Eemshaven. Bij meer aanlanding in de Eemshaven kan het verplaatsen van één aanlanding naar Flevoland wel een gunstig effect hebben.
- Aanlanding in Lelystad in plaats van de Kop van Noord-Holland leidt tot iets grotere knelpunten aan de HS-verbindingen tussen Lelystad en Diemen, en heeft daarmee een

negatieve impact op de belasting van die HS-verbindingen. Hierdoor is naar verwachting meer redispatch (beperkte ingreep) nodig op enkele verbindingen.

## 6 Beoordeling Noord-Nederland

### 6.1 Omschrijving regio

#### 6.1.1 Potentiële routes en aansluitlocaties

De potentiële oplossingsrichtingen voor elektrische routes en waterstofroutes voor Noord-Nederland worden onderzocht in het parallelle Programma Aansluiting Wind Op Zee – Eemshaven (PAWOZ-Eemshaven). In de IEA van pVAWOZ nemen we de onderzoeksresultaten over van de routes van PAWOZ-Eemshaven die overblijven voor na 2030. Daarnaast nemen we deze regio mee bij de analyses voor systeemintegratie, aangezien het hierbij gaat om de totale impact van alle regio's op het energiesysteem.

Bij de elektrische aanlanding wordt gekeken naar routes het nieuw te bouwen 380kV-station in de Eemshaven. Bij waterstofroutes wordt gekeken naar routes richting de Eemshaven en Grijpskerk.

#### 6.1.2 Relevante aspecten voor systeemintegratie

In de routekaart windenergie op zee 21 GW staat 2,6 GW elektrische aanlanding gepland in deze regio bij de Eemshaven. Dit is exclusief Doordewind II, aangezien deze niet in routekaart windenergie op zee 21 GW en dus binnen de scope van pVAWOZ valt.

Vanaf de Eemshaven loopt een 380 kV-verbinding met twee circuits richting Meeden, via Musselkanaal en Veenoord richting Zwolle. Daarnaast wordt een 380 kV-verbinding gerealiseerd vanaf de Eemshaven richting Vierverlaten en vervolgens richting Ens. Deze verbinding krijgt vier circuits tot Vierverlaten en vanaf Vierverlaten twee circuits. In totaal zijn er dus zes afvoerende 380 kV-circuits tot Vierverlaten en vier 380 kV-circuits vanaf Vierverlaten. Dit betekent dat er veel capaciteit is op het 380kV-net om windstroom af te voeren vanaf de Eemshaven richting de rest van Nederland.

De onderstaande tabel geeft de kerncijfers voor vraag, aanbod en flexibiliteit in de regio Noord-Nederland. De elektriciteitsvraag in de regio zal in 2040 naar verwachting 15 tot 17 TWh per jaar zijn. Hiervan komt een groot deel van datacenters en chemische industrie. De elektriciteitsvraag is gemiddeld 1,7- 1,9 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding uit de routekaart al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische aanlandingen zal doorgevoerd worden richting de rest van Nederland. De vraag is hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

Tabel 6-1 Kerncijfers vraag, aanbod en flexibiliteit Noord-Nederland<sup>29</sup>

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
<b>Vraag en aanbod</b>		
<i>Elektriciteitsvraag</i>	17 TWh/ 1,9 GW	15 TWh/1,7 GW
<i>Wind op land</i>	1.400 MW	800 MW
<i>Zon-pv</i>	4.700 MW	3.800 MW
<b>Flexibiliteit (afhankelijk van hoeveelheid elektrische aanlanding)</b>		
<i>Elektrolyzers</i>	1.050 tot 3.900 MW	500 tot 2.000 MW

De belangrijkste factoren die impact hebben op het aantal elektrische aanlandingen dat in Noord-Nederland mogelijk is zijn:

- **Ontwikkeling elektrolyzers.** Deze zetten lokaal overschotten van elektriciteit om in waterstof, zodat deze niet doorgevoerd hoeven te worden richting de rest van Nederland. In beide scenario's is uitgegaan van een aanzienlijk vermogen aan elektrolyzers. Als deze niet gerealiseerd worden, dan zullen minder elektrische aanlandingen mogelijk zijn. De ontwikkeling van elektrolyse verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse is naar de wisselwerking tussen elektrolyse en wind op zee gekeken (paragraaf 5.2).
- **Ontwikkeling van de elektriciteitsvraag van industrie.** Bij minder elektriciteitsvraag, bijvoorbeeld door krimp/vertrek van lokale industrie, is minder elektrische aanlanding mogelijk. Bij meer elektriciteitsvraag is meer elektrische aanlanding mogelijk. De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse hebben we gekeken naar de plannen van de CES (paragraaf 5.3).
- **Eventuele ontwikkeling kernenergie.** De lokale overschotten veroorzaakt door gelijktijdige productie van kerncentrales als windparken op zee moeten via dezelfde 380kV-verbindingen vanaf Noord-Nederland richting de rest van Nederland getransporteerd worden. Hier hebben we in een gevoeligheidsanalyse naar gekeken (zie paragraaf 5.4).
- **Import/export elektriciteit.** Bij de Eemshaven zijn DC-interconnecties aanwezig richting Denemarken en Noorwegen, beiden met een capaciteit van 1 GW. Daarnaast is bij Meeden een AC- interconnectie aanwezig richting Duitsland. Als er veel export plaatsvindt op momenten met veel productie van windparken op zee, dan is meer aanlanding mogelijk. Als er op momenten met veel productie van windparken op zee juist import plaatsvindt, dan is minder aanlanding mogelijk.

Bij de potentiële waterstofaanlanding in Noord-Nederland zal waterstof vanaf Grijpskerk of de Eemshaven naar landelijke waterstofnetwerk getransporteerd worden. Bij waterstofaanlanding in de Eemshaven is ook de capaciteit van elektrolyse op land van belang. De geproduceerde waterstof van elektrolyse op land zal namelijk via dezelfde buisleidingen getransporteerd worden.

## 6.2 Beoordeling elektrische aanlandingen

### 6.2.1 Benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Er zijn verschillende mogelijke elektrische routes richting de Eemshaven. Het eerste deel van de routes vanaf het windpark wordt onderzocht in pVAWOZ. Vanaf een demarcatiepunt tot aan de Eemshaven worden de routes onderzocht in PAWOZ. De routes komen vanuit windgebieden Doordewind en 6/7. Vergelijken met de andere potentiële aansluitlocaties hebben de alternatieven richting Noord-Nederland een **korte of korte/gemiddelde lengte**.

<sup>29</sup> De geografische afbakening bij deze cijfers is de provincie Groningen.

Tabel 6-2 Beoordeling benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen Noord-Nederland

Effect	Oostpolder – vanaf DD	Oostpolder – vanaf 6/7
Korte lengte	X	X
Gemiddelde lengte		X
Grote lengte		

### 6.2.2 Aansluitcapaciteit

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang.

Hierbij maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er is in de regio Noord-Nederland één potentiële aansluitlocatie, namelijk het geplande 380kV-station Oostpolder in de Eemshaven. Bij dit geplande 380kV-station kunnen maximaal vier elektrische aanlandingen (drie bovenop DDW2) aangesloten worden, waarbij nog wel onderzoek nodig is of vier aanlandingen mogelijk zijn vanuit beheersbaarheid en systeemstabiliteit.

Er zit een limiet aan de hoeveelheid productie die op één station aangesloten kan worden. Als grootschalige kerncentrales gerealiseerd worden op station Oostpolder, dan is het onzeker of er nog (voldoende) mogelijk is om elektrische aanlanding van wind op zee op dit station aan te sluiten.

De onderstaande tabel geeft het overzicht van de beoordeling van de aansluitcapaciteit van stations voor elektrische aanlanding in Noord-Nederland.

Tabel 6-3 Beoordeling aansluitcapaciteit stations Noord-Nederland

Effect	Station Oostpolder
Geen ingreep	Tot maximaal vier aansluitingen, onderzoek nodig of dit haalbaar is vanuit beheersbaarheid en systeemstabiliteit
Beperkte ingreep of onzeker	
Grote ingreep	Meer dan drie aanlandingen

### 6.2.3 Impact op afvoerende 380kV-verbindingen

De elektriciteit van de windparken op zee wordt deels in de regio gebruikt, maar wordt grotendeels doorgevoerd via hoogspanningsverbindingen. Bij dit effect beoordelen we de impact van de aanlanding van wind op zee op deze verbindingen en de ingrepen die nodig zijn om de windenergie af te voeren.

Hierbij maken we onderscheid tussen drie soorten ingrepen (meer toelichting in paragraaf 3.4.4):

- Geen ingreep noodzakelijk.
- Een operationele ingreep, met redispatch. Dit is een beperkte ingreep.

- Een grote ingreep. Zoals netverzwaring, systeemoplossing of een markingreep (zie paragraaf 3.4.4).

Vanaf de Eemshaven loopt een 380 kV-verbinding met twee circuits richting Meeden, via Musselkanaal en Veenoord richting Zwolle. Daarnaast wordt een 380kV-verbinding gerealiseerd vanaf de Eemshaven richting Vierverlaten en vervolgens richting Ens. Deze verbinding krijgt vier circuits tot Vierverlaten en vanaf Vierverlaten twee circuits. In totaal zijn er dus zes afvoerende 380 kV-circuits tot Vierverlaten en vier 380 kV-circuits vanaf Vierverlaten.

De elektriciteitsvraag is gemiddeld 1,7 tot 1,9 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding uit de routekaart al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische aanlandingen zal doorgevoerd worden richting de rest van Nederland (en deels naar Denemarken en Noorwegen via interconnectoren), wat betekent dat de capaciteit voor het afvoeren van windstroom via de toekomstige 380kV-verbindingen richting de rest van Nederland de beperkende factor is.

In de doorrekeningen zijn configuraties met nul tot vier aanlandingen van 2 GW in Noord-Nederland, bovenop de routekaart windenergie op zee 21 GW, doorgerekend voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, zie paragraaf 1.3.1). Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor de eventuele ontwikkeling van twee grote kerncentrales, de energievraag van de industrie en de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibiliteit.

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij het scenario Nationaal Leiderschap kunnen twee elektrische aanlanding ingepast worden met een beperkte ingreep. Bij het scenario Europese Integratie gaat het om drie elektrische aanlandingen met een beperkte ingreep. Bij meer elektrische aanlandingen zijn grote ingrepen noodzakelijk.
- Uit de doorrekeningen volgt dat er door de aanlanding van wind op zee vooral ingrepen nodig zijn op de 380kV-verbindingen Meeden-Musselkanaal, Musselkanaal-Veenoord en Veenoord-Zwolle. Dit komt naar verwachting door de gezamenlijke impact van het afvoeren van windstroom en loop-flows<sup>30</sup>. De import- en exportstromen van elektriciteit bij Meeden zijn bepaald op basis van markt- en netmodelleringen, maar zijn lastig te voorspellen richting de toekomst. Daarmee is dit een onzekerheid. Als er minder import en loop-flows via Meeden zijn, dan kunnen mogelijk meer elektrische aanlandingen ingepast worden in Noord-Nederland.
- Bij realisatie van twee grote kerncentrales in Noord-Nederland is één elektrische aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in beide energetische scenario's. In de CES 3.0 van Noord-Nederland is een ambitie voor de ontwikkeling van elektrolyse vastgelegd die een 1,7 GW hoger ligt dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Als dit gerealiseerd wordt kan naar verwachting een extra elektrische aanlanding ingepast worden, aangezien we verwachten dat er een sterke correlatie is tussen de afname van elektriciteit van elektrolyzers en het aanbod van wind op zee. Gezien de huidige ontwikkelingen rondom elektrolyse is het echter wel onzeker of deze hoge ambitie uit de CES 3.0 realistisch is.

<sup>30</sup> Dit zijn transportstromen die vanuit Duitsland bij Meeden Nederland binnenkomen en via Hengelo weer naar Duitsland lopen.

Tabel 6-4 Beoordeling impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen Noord-Nederland

Effect	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Met twee grote kerncentrales
Geen ingreep			Eén aanlanding
Beperkte ingreep	Twee aanlandingen	Drie aanlandingen	
Grote ingreep	Meer dan twee aanlandingen	Meer dan drie aanlandingen	Meer dan één aanlanding

## 6.2.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor elektrische aanlanding in de regio Noord-Nederland op de algehele elektriciteitsinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel<sup>31</sup>.

Tabel 6-5 Beoordeling elektrische aanlandingen Noord-Nederland

Beoordeeld effect	380kV-station Oostpolder
Energie-infrastructuur tot aansluitlocatie	Kort/gemiddeld
Aansluitcapaciteit	Tot vier aanlandingen mogelijk zonder grote ingreep. Nog wel onderzoek nodig of vier aanlandingen mogelijk zijn vanuit beheersbaarheid en systeemstabiliteit.
Impact op HS-verbindingen	Twee of drie aanlandingen mogelijk zonder grote ingreep, in basisscenario's Bij twee grote kerncentrales: één aanlanding zonder grote ingreep.

De lengte van het kabeltracé vanaf het windpark op zee tot aan de potentiële aansluitlocatie in Noord-Nederland is kort of gemiddeld (afhankelijk van het specifieke tracé), wat betekent dat er relatief weinig nieuwe **energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie** nodig is.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat bij de enige potentiële aansluitlocatie in Noord-Nederland, 380kV-station Oostpolder, maximaal vier elektrische aanlandingen (drie bovenop DDW2) aangesloten kunnen worden. Daarbij is nog wel onderzoek nodig of vier aanlandingen mogelijk zijn vanuit beheersbaarheid en systeemstabiliteit.

Er zit een limiet aan de hoeveelheid productie die op één station aangesloten kan worden. Als grootschalige kerncentrales gerealiseerd worden op station Oostpolder, dan is het onzeker of er nog (voldoende) mogelijk is om elektrische aanlanding van wind op zee op dit station aan te sluiten.

<sup>31</sup> De realisatie van windpark Doordewind II valt niet in routekaart windenergie op zee 21 GW en zit dus in de scope van pVAWOZ. Dit is daarmee één van de potentiële elektrische aanlandingen in deze regio.

### **Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructureur, geen absolute waarheid**

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructureur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

Bij het scenario Nationaal Leiderschap kunnen twee elektrische aanlanding ingepast worden zonder grote ingreep aan de HS-verbindingen. Bij het scenario Europese Integratie gaat het om drie elektrische aanlandingen zonder grote ingreep

Een onzekerheid hierbij zijn de ontwikkeling van import/export en loop-flows<sup>32</sup> bij Meeden. De gezamenlijke impact van het afvoeren van windstroom en loop-flows die vanuit Duitsland bij Meeden Nederland binnenkomen (en via Hengelo weer naar Duitsland lopen) kunnen er namelijk voor zorgen dat grote ingrepen nodig zijn bij HS-verbindingen vanaf Meeden naar Zwolle. Als er minder import en loop-flows via Meeden zijn, dan kunnen mogelijk meer elektrische aanlandingen ingepast worden in Noord-Nederland dan dat nu uit de beoordeling volgt.

Een afhankelijkheid bij de impact van elektrische aanlandingen in Noord-Nederland is de eventuele ontwikkeling van kernenergie. Bij realisatie van twee grote kerncentrales in Noord-Nederland is één elektrische aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in beide energetische scenario's.

---

<sup>32</sup> Dit zijn transportstromen die vanuit Duitsland bij Meeden Nederland binnenkomen en via andere interconnectiepunten (zoals Hengelo of Doetinchem) weer naar Duitsland gaan.

### Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marketingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marketingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## 6.3 Beoordeling waterstofverbindingen

In de regio Noord-Nederland zijn twee potentiële waterstofaanlandlocaties: Eemshaven en Grijskerk. Deze worden in deze paragraaf beiden beoordeeld.

### 6.3.1 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op zee

Het waterstofnetwerk op zee, dat loopt vanaf elektrolyzers op zee naar de aanlandlocatie in Noord-Nederland, heeft vergeleken met andere potentiële aanlandlocaties voor beide aanlandroutes een **korte of gemiddelde lengte** (afhankelijk van het specifieke tracé).

### 6.3.2 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op land tot aan nationaal netwerk

Bij de aanlandlocatie Eemshaven is voor het waterstoftransport van aanlandlocatie naar het Waterstofnetwerk Nederland (WNL) een nieuwe buisleiding van enkele kilometers noodzakelijk. De complexiteit voor het realiseren van deze buisleiding is relatief groot doordat het een druk gebied is met veel ontwikkelingen, waardoor er weinig ruimte is in de ondergrond. Omdat de complexiteit van deze route groot is hebben we deze beoordeeld als een **ingreep met gemiddelde risico's**.

Bij de aanlandlocatie Grijskerk is een nieuwe buisleiding met een lengte van enkele tientallen kilometers. Deze nieuwe buisleiding kan naar verwachting naast bestaande buisleidingen gelegd worden en uit het onderzoek van PAWOZ volgt dat de complexiteit naar verwachting relatief beperkt is. Omdat de lengte van de nieuwe buisleiding groot is hebben we deze beoordeeld als een **gemiddelde ingreep**.

### 6.3.3 Benodigde uitbreidingen van het Waterstofnetwerk Nederland

Uit de netwerkanalyse van Gasunie volgt dat er geen extra ingrepen nodig zijn bij het Waterstofnetwerk Nederland als gevolg van de waterstofaanlanding bij de Eemshaven, bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn (zie paragraaf 3.5.1). Er zijn daarnaast weinig risico's vanuit de projectplanning van Waterstofnetwerk Nederland.

Bij aanlanding in Grijpskerk is mogelijk hergebruik van buisleidingen nodig en zijn er risico's voor deze aanlanding vanuit de projectplanning van Waterstofnetwerk Nederland. Voor waterstofaanlanding in Grijpskerk is een deel van de IJsselmeerroute nodig (vanaf waterstofnetwerk Noord-Nederland), waarvoor nog geen projectprocedure is gestart en die nog geen P50 of P90-planning<sup>33</sup> heeft. Daarom beoordelen we dit als een **ingreep met gemiddelde risico's**. Voor een buisleiding richting Grijpskerk kan waarschijnlijk een bestaande leiding gebruikt worden, waarvan realisatie in de eerste helft van de jaren '30 haalbaar lijkt.

### 6.3.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van aanlanding van waterstof in Eemshaven en Grijpskerk op de algehele waterstofinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 6-6 Beoordeling impact waterstofaanlanding in Noord-Nederland op waterstofinfrastructuur

Effect	Infrastructuur op zee	Infrastructuur op land tot landelijk netwerk	Waterstofnetwerk Nederland
<b>Eemshaven</b>			
Geen ingreep/korte lengte en weinig risico's	X		X
Beperkte/gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's	X	X	
Grote ingreep of grote risico's			
<b>Grijpskerk</b>			
Geen ingreep/korte lengte en weinig risico's	X		
Beperkte/gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's	X	X	X
Grote ingreep of grote risico's			

## 6.4 Beoordeling elektrolyse

### 6.4.1 Aansluitcapaciteit

Grootschalige elektrolyzers moeten worden aangesloten op hoogspanningsstations. Hier moet voldoende aansluitcapaciteit voor beschikbaar zijn. Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

<sup>33</sup> Dit houdt in dat ingeschat wordt dat het project met respectievelijk 50% of 90% zekerheid op die datum gerealiseerd kan worden.

Er zijn in de regio Noord-Nederland één station waarnaar gekeken wordt voor elektrische aanlanding, het geplande 380kV-station Eemhaven Oostpolder. Bij het geplande station Oostpolder kan naar verwachting grootschalige elektrolyse aangesloten worden zonder ingrepen, omdat er op de nieuwe stations veel vrije velden beschikbaar zijn. Deze velden kunnen echter ook voor andere klantaanvragen of netuitbreidingen gebruikt worden, dus dit beeld kan nog veranderen richting de toekomst.

Tabel 6-7 Beoordeling aansluitcapaciteit elektrolyzers stations Noord-Nederland

Effect	380kV-station Oostpolder
Geen ingreep	X
Beperkte ingreep of onzeker	
Grote ingreep	

#### 6.4.2 Impact op hoogspanningsverbindingen

Bij dit effect beoordelen we de impact van grootschalige elektrolyse op de belasting van de hoogspanningsverbindingen. Elektrolyzers hebben een, in veel gevallen positieve, impact op de hoogspanningsverbindingen doordat ze leiden tot extra elektriciteitsvraag bij de aansluitlocaties, waardoor minder elektriciteit afgevoerd dient te worden via de hoogspanningsverbindingen en deze minder belast worden. Dit beoordelen we voor de hele regio.

Grootschalige elektrolyse heeft in Noord-Nederland een positief effect op de belasting van de hoogspanningsverbindingen, aangezien met name knelpunten op de 380kV-verbindingen plaatsvinden door afvoer van overschotten van windstroom en dat deze minder worden door inzet van grootschalige elektrolyse.

Elektrolyzers kunnen ook nieuwe knelpunten op hoogspanningsverbindingen veroorzaken, als ze ingezet worden op momenten met weinig productie van windparken op zee (maar bijvoorbeeld wel veel zonproductie in andere regio's). Dan leidt inzet van elektrolyzers tot extra transport richting de aansluitlocaties. Dit leidt in Noord-Nederland naar verwachting niet tot nieuwe knelpunten. Dit komt doordat bij de hoogspanningsverbindingen vanaf Noord-Nederland richting de rest van Nederland alleen knelpunten ontstaan door afvoer van windstroom, en niet door aanvoer van elektriciteit op windluwe momenten.

Bovenstaande betekent dat elektrolyzers in Noord-Nederland naar verwachting een positieve impact hebben op de belasting van hoogspanningsverbindingen, en geen nieuwe problemen veroorzaken. Hiermee kunnen ze bijdragen aan de inpassing van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet en is de beoordeling **zeer positief**.

Tabel 6-8 Beoordeling impact elektrolyzers op HS-verbindingen Noord-Nederland

Score	Effect	Impact op HS-verbindingen
++	Zeer positief	X
+	Positief	
0	Neutraal	

### 6.4.3 Impact op waterstofinfrastructuur

De waterstof die geproduceerd met de elektrolyzers zal afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk (en deels lokaal benut worden). Het is de verwachting dat het voorziene WNL hiervoor voldoende capaciteit heeft en dat er geen extra leidingen nodig zijn om grootschalige elektrolyse in Noord-Nederland mogelijk te maken (bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn, zie paragraaf 3.5.1). Dat geldt ook bij combinatie met waterstofaanlanding en bij realisatie van de ambitie voor elektrolyse op land vanuit de CES 3.0, die hoger ligt dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's (zie paragraaf 5.3).

Tabel 6-9 Beoordeling impact elektrolyzers waterstofinfrastructuur Noord-Nederland

Effect	Impact op waterstofinfrastructuur
Geen ingreep	X
Beperkte ingreep of onzeker	
Grote ingreep	

### 6.4.4 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

In de omgeving van de potentiële aansluitlocatie station Oostpolder in de **Eemshaven** is er weinig gebouwde omgeving en een beperkte hoeveelheid glastuinbouw. De stad Groningen zou echter potentieel wel gebruik kunnen maken van de geproduceerde restwarmte, al moet de warmte dan wel over een lange afstand getransporteerd worden. Dit betekent dat er een onzeker potentieel is voor benutting van de restwarmte in de regio. Daarom is de beoordeling **neutraal**.

Tabel 6-10 Beoordeling mogelijkheid benutting restwarmte Noord-Nederland

Score	Effect	Mogelijkheid benutting restwarmte Eemshaven
+	Positief	
0	Neutraal	X
-	Negatief	

### 6.4.5 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse pVAWOZ

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>34</sup>.
- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vergelijking van de huidige plannen met de aannames in de scenario's. In Noord-Nederland is de bovengrens van de huidige plannen al gelijk aan de aangenomen hoeveelheden bij het scenario Europese Integratie met weinig extra aanlanding van wind op zee. Dit zijn echter nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is. Bij meer aanlanding van wind op zee en bij het scenario Nationaal Leiderschap is de aangenomen hoeveelheid elektrolyse nog wel meer dan (de bovengrens van) de huidige plannen.

Tabel 6-11 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Noord-Nederland	0 – 1.000 MW	1.000 – 3.900 MW	500 – 2.000 MW

#### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

<sup>34</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

## 6.4.6 Conclusies

De beoordeling van grootschalige elektrolyse in Noord-Nederland is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 6-12 Beoordeling elektrolyzers Noord-Nederland

Beoordeeld effect	Station Oostpolder
Aansluitcapaciteit	Geen ingreep
Impact op HS-verbindingen	Zeer positief
Impact op waterstofinfrastructuur	Geen ingreep
Mogelijkheid benutting restwarmte	Neutraal
Bestaande plannen en noodzaak meer elektrolyse	Mogelijk extra elektrolyse bovenop bestaande plannen wenselijk. Daarnaast bestaande plannen nog onzeker.

Grootschalige elektrolyse kan naar verwachting aangesloten worden op het geplande 380kV-station Oostpolder zonder ingreep. Daarnaast kan de geproduceerde waterstof naar verwachting afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk, zonder significante uitbreidingen. Dit betekent dat het naar verwachting **mogelijk** is om grootschalige elektrolyse te realiseren in de regio zonder forse uitbreidingen van de energie-infrastructuur.

Grootschalige elektrolyse in de regio heeft naar verwachting een zeer positieve impact op de belasting van hoogspanningsverbindingen en kan daarmee bijdragen aan de integratie van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet. Daarmee is grootschalige elektrolyse in de regio **gunstig**, bij elektrische aanlanding van wind op zee. Het is onzeker of de geproduceerde restwarmte in regio benut kan worden.

In Noord-Nederland is de bovengrens van de huidige plannen al gelijk aan de aangenomen hoeveelheden bij het scenario Europese Integratie met weinig extra aanlanding van wind op zee. Dit zijn echter nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is. Bij meer aanlanding van wind op zee en bij het scenario Nationaal Leiderschap is de aangenomen hoeveelheid elektrolyse nog wel hoger dan (de bovengrens van) de huidige plannen.

## 6.5 Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers

De elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen en verminderen de belasting op de HS-verbindingen. Bij beide doorgerekende scenario's, met een verschillende hoeveelheid elektrolyse op land, kunnen echter wel evenveel elektrische aanlandingen ingepast worden zonder grote ingreep. Dit betekent dat de extra elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap (ten opzichte van het scenario Europese Integratie) niet zo'n grote impact heeft dat een extra elektrische aanlanding mogelijk is. Daarbij moet wel benoemd worden dat ook het scenario Europese Integratie, met relatief weinig elektrolyse en elektrificatie, uitgaat van een toename van elektrolyse en overige elektriciteitsvraag ten opzichte van de huidige plannen. Als er nog minder elektrolyse en/of elektrificatie dan in dit scenario komt, dan kan dat wel betekenen dat minder elektrische aanlandingen ingepast kunnen worden.

- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aanlanding, hoe meer elektrolyse gewenst is en vice versa. Er wordt in de doorrekening uitgegaan van maximaal 2.000 tot 3.900 MW elektrolyse, bij twee elektrische aanlandingen in de regio. Deze inschatting is gemaakt met de modellering van ii3050. In deze modellering is een inschatting gemaakt van een efficiënte hoeveelheid aan elektrolyzers, in Nederland en per regio, op basis van de lokale balans van vraag en aanbod.
- Dezelfde waterstofleidingen worden gebruikt voor het transport van waterstofaanbod van grootschalige elektrolyse op land en waterstofaanlandingen. In Noord-Nederland heeft het voorziene Waterstofnetwerk Nederland voldoende capaciteit om beide ontwikkelingen te faciliteren.

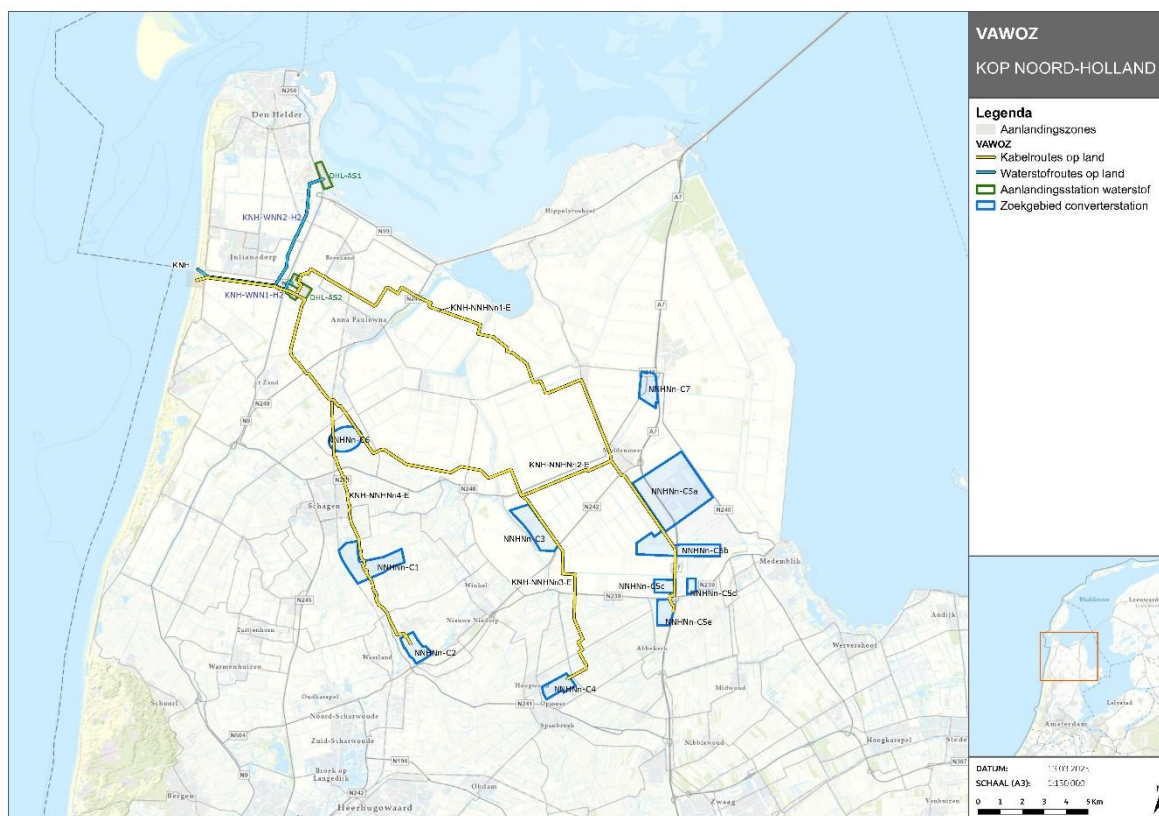
## 7 Beoordeling Kop van Noord-Holland

### 7.1 Omschrijving regio

#### 7.1.1 Potentiële routes en aansluitlocaties

In Figuur 7-1 staan de potentiële elektrische en waterstofroutes in de Kop van Noord-Holland. De elektrische routes lopen vanaf de aanlandingszone naar het geplande station Netuitbreiding Noord-Holland Noord-noord (NNHN-noord). Voor dit laatste station wordt de exacte ligging van het nieuwe 380kV-station vastgesteld in het project 380kV Netuitbreiding Noord-Holland Noord.

De waterstofroutes lopen tot het gebied rond Den Helder, waar het toekomstige landelijke waterstofnetwerk zal gaan lopen. Voor een **aanlandingsstation** voor waterstof zijn twee zoekgebieden in beeld: een zoekgebied nabij het gascompressorstation Anna Paulowna en een zoekgebied nabij het NAM-terrein ten zuidoosten van Den Helder.



Figuur 7-1 Elektrische en waterstofroutes in de Kop van Noord-Holland

#### 7.1.2 Relevante aspecten voor systeemintegratie

In de routekaart windenergie op zee 21 GW is geen aanlanding van wind op zee opgenomen voor de Kop van Noord-Holland, aangezien daar nu nog geen 380 kV-infrastructuur aanwezig is. Momenteel loopt een ruimtelijke procedure voor een 380 kV-verbinding vanaf de 380 kV-verbinding tussen Beverwijk en Diemen (vanaf een nieuw 380kV-stations) naar de Kop van Noord-Holland. Dit maakt aanlanding van wind op zee in de Kop van Noord-Holland mogelijk. Het is op dit moment nog

onduidelijk of de verbinding richting de Kop van Noord-Holland twee of vier circuits zal krijgen. In de ruimtelijke procedure worden beide opties onderzocht. Twee circuits zijn in ieder geval nodig, los van de ontwikkeling van wind op zee. De uitkomsten van pVAWOZ, en dus ook van dit hoofdstuk, zijn input voor het bepalen van de nut en noodzaak voor een derde en vierde circuit.

De onderstaande tabel geeft de kerncijfers voor vraag, aanbod en flexibiliteit in de regio de Kop van Noord-Holland. De elektriciteitsvraag in de regio zal in 2040 naar verwachting 8 tot 9 TWh per jaar zijn, wat overeenkomt met gemiddeld 1 GW. Hiervan komt een significant deel van datacenters. Dit betekent dat bij meer dan 2 GW elektrische aanlanding een fors aandeel van de windstroom doorgevoerd zal worden richting de rest van Nederland, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De capaciteit van de 380kV-verbinding richting Noord-Holland Zuid (en verder richting de rest van Nederland) is dan een bepalende factor.

Tabel 7-1 Kerncijfers vraag, aanbod en flexibiliteit Kop van Noord-Holland<sup>35</sup>

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
<b>Vraag en aanbod</b>		
<i>Elektriciteitsvraag</i>	9 TWh/1 GW	8 TWh/1 GW
<i>Wind op land</i>	250 MW	150 MW
<i>Zon-pv</i>	1.500 MW	1.200 MW
<b>Flexibiliteit (afhankelijk van hoeveelheid elektrische aanlanding)</b>		
<i>Elektrolyzers</i>	0 tot 1.750 MW	0 tot 900 MW

De belangrijkste factoren die impact hebben op het aantal elektrische aanlandingen dat in de Kop van Noord-Holland mogelijk is zijn:

- **Ontwikkeling elektrolyzers.** Deze zetten lokaal overschotten van elektriciteit om in waterstof, zodat deze niet doorgevoerd hoeven te worden richting de rest van Nederland. In beide scenario's is uitgegaan van een aanzienlijk vermogen aan elektrolyzers. Als deze niet gerealiseerd worden, dan zullen minder elektrische aanlandingen mogelijk zijn. De ontwikkeling van elektrolyse verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse is in meer detail naar de wisselwerking tussen elektrolyse en wind op zee gekeken (paragraaf 5.2).
- **Wisselwerking Noord-Holland Zuid.** Overschotten van wind vanuit de Kop van Noord-Holland (als daar wind op zee gerealiseerd wordt) worden via Noord-Holland Zuid afgevoerd richting de rest van Nederland. Dit betekent dat naar de gezamenlijke impact van aanlanding in de Kop van Noord-Holland en Noord-Holland Zuid op het hoogspanningsnet gekeken moet worden.
- **Ontwikkeling netuitbreiding Randstad.** In de analyses wordt uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker. We hebben de situatie zonder deze netuitbreiding in de Randstad onderzocht in een gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 5.5).

Bij de potentiële waterstofaanlanding in de Kop van Noord-Holland zal waterstof getransporteerd worden via het landelijke waterstofnetwerk dat hier langs zal lopen. Voor de waterstofaanlanding is ook de capaciteit van elektrolyse op land van belang. De geproduceerde waterstof van elektrolyse op land zal namelijk via dezelfde buisleidingen getransporteerd worden.

<sup>35</sup> De geografische afbakening bij deze cijfers is de veiligheidsregio Noord-Holland Noord.

## 7.2 Beoordeling elektrische aanlandingen

Hieronder volgt de beoordeling van de elektrische aanlandingen. Hiervoor beoordelen we de effecten voor de aansluitcapaciteit, impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen en benodigde nieuwe energie-infrastructuur op zee. De impact op het volledige 380kV-net en de wisselwerking met andere regio's bespreken we in hoofdstuk 4.

### 7.2.1 Benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Er zijn verschillende mogelijke elektrische routes richting de twee aansluitlocaties in de regio Kop van Noord-Holland, vanaf windgebieden Doordewind (West)<sup>36</sup> en 6/7. Vergeleken met de andere potentiële aansluitlocaties hebben de alternatieven vanaf 6/7 richting de Kop van Noord-Holland een **korte lengte**. Bij de routes vanaf Doordewind is het afhankelijk van de specifieke route, enkele potentiële routes hebben ook een **gemiddelde lengte**.

Tabel 7-2 Beoordeling benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen Kop van Noord-Holland

Effect	NNHN Noord – vanaf DDW	NNHN Noord – vanaf 6/7
Korte lengte	X	X
Gemiddelde lengte	X	
Grote lengte		

### 7.2.2 Aansluitcapaciteit

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang.

Hierbij maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er is in de regio Kop van Noord-Holland één potentieel aansluitstation, namelijk het geplande station NNHN-noord. Hier kunnen naar verwachting in ieder geval twee elektrische aansluitingen gerealiseerd worden. Nader onderzoek door TenneT is noodzakelijk om te bepalen of ook een derde elektrische aansluiting mogelijk is, dit is dus onzeker. Bij meer dan drie aanlandingen is een nieuw 380kV-station nodig, wat een grote ingreep is.

De onderstaande tabel geeft het overzicht van de beoordeling van de aansluitcapaciteit van stations voor elektrische aanlanding in de Kop van Noord-Holland.

Tabel 7-3 Beoordeling aansluitcapaciteit stations Kop van Noord-Holland

Effect	Station NNHN-noord
--------	--------------------

<sup>36</sup> Een aanlanding vanuit Doordewind West richting de kop van Noord-Holland is onderzocht in de IEA, maar ondertussen is gebleken dat realisatie hiervan niet haalbaar is.

Geen ingreep	Tot twee aanlandingen
Beperkte ingreep of onzeker	Drie aanlandingen
Grote ingreep	Meer dan drie aanlandingen

### 7.2.3 Impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen

De elektriciteit van de windparken op zee wordt deels in de regio gebruikt, maar wordt grotendeels doorgevoerd via hoogspanningsverbindingen. Bij dit effect beoordelen we de impact van de aanlanding van wind op zee op deze verbindingen en de ingrepen die nodig zijn om de windenergie af te voeren.

Hierbij maken we onderscheid tussen drie soorten ingrepen (meer toelichting in paragraaf 3.4.4):

- Geen ingreep noodzakelijk.
- Een operationele ingreep, met redispatch. Dit is een beperkte ingreep.
- Een grote ingreep. Zoals netverzwaring, systeemoplossing of een marketingreep (zie paragraaf 3.4.4).

De Kop van Noord-Holland is op dit moment alleen met 150 kV-verbindingen verbonden met de rest van Nederland. Momenteel loopt een ruimtelijke procedure voor een 380 kV-verbinding vanaf één van de nieuwe stations op de 380 kV-verbinding tussen Beverwijk en Diemen (nog onduidelijk welk nieuw station) naar de Kop van Noord-Holland. Het is op dit moment nog onduidelijk of de verbinding richting de Kop van Noord-Holland twee of vier circuits zal krijgen. In de ruimtelijke procedure worden beide opties onderzocht. Twee circuits zijn in ieder geval nodig, los van de ontwikkeling van wind op zee. De uitkomsten van pVAWOZ zijn input voor het bepalen van de nut en noodzaak voor een derde en vierde circuit. Zonder aanlanding van wind op zee in de Kop van Noord-Holland zijn twee circuits naar verwachting voldoende. Daarom beoordelen we de effecten, ten opzichte van de situatie met twee circuits.

In de doorrekeningen zijn configuraties met nul tot drie aanlandingen van 2 GW in de Kop van Noord-Holland en twee tot vier aanlandingen van 2 GW in Noord-Holland als geheel doorgerekend, voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, zie paragraaf 1.3.1). Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor de ontwikkeling van de Randstad uitbreiding en de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibiliteit.

De conclusies over de impact van elektrische aanlanding op de afvoerende 380kV-verbindingen zijn:

- Het is naar verwachting mogelijk om één aanlanding in de Kop van Noord-Holland te realiseren bij twee 380kV-circuits. Dit betekent dat er een **grote ingreep** nodig is bij meer dan één elektrische aanlanding.
- In de doorrekeningen van TenneT is gerekend met vier 380kV-circuits tussen de Kop van Noord-Holland en Noord-Holland Zuid. Er zijn dan **geen aanvullende ingrepen** aan de HS-verbindingen nodig tot drie aanlandingen van 2 GW in de kop van Noord-Holland (en tot 4 aanlandingen van 2 GW in Noord-Holland als geheel), voor beide energetische scenario's.
- Het is onzeker wat de effecten zijn bij meer aanlanding, in Noord-Holland Zuid of in Noord-Holland als geheel, aangezien dit niet doorgerekend is door TenneT.
- Een belangrijke onzekerheid voor aanlanding in Noord-Holland is de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5). Als deze complexe netuitbreiding niet

(tijdig) gerealiseerd wordt, dan lijkt maximaal één aanlanding in de kop van Noord-Holland mogelijk zonder grote ingrepen.

Tabel 7-4 Beoordeling impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen Kop van Noord-Holland

Effect	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Geen netuitbreiding Randstad
Geen ingreep	Eén aanlanding	Eén aanlanding	
Beperkte ingreep			Eén aanlanding
Grote ingreep	Meer dan één aanlanding	Meer dan één aanlanding	Meer dan één aanlanding

## 7.2.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor elektrische aanlanding in de regio Kop van Noord-Holland op de algehele elektriciteitsinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 7-5 Beoordeling elektrische aanlandingen Kop van Noord-Holland

Beoordeeld effect	Station NNHN-noord
Energie-infrastructuur tot aansluitlocatie	Korte lengte bij routes vanaf 6/7 Korte of gemiddelde lengte bij routes vanaf DDW
Aansluitcapaciteit	Geen ingreep bij één of twee aanlandingen Onzeker of derde aanlanding kan zonder ingreep Grote ingreep bij meer dan drie aanlandingen
Impact op afvoerende HS-verbindingen	Geen ingreep (twee 380kV-circuits NNHN) bij één aanlanding, grote ingreep (vier 380kV-circuits NNHN) bij meer dan één aanlanding. Bij vier 380kV-circuits richting Kop Noord-Holland tot drie aanlandingen, zonder (aanvullende) grote ingreep. Onzekerheid door de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5), zonder deze uitbreiding lijkt één aanlanding mogelijk in kop Noord-Holland zonder grote ingreep.

Er zijn potentiële routes voor elektrische aanlandingen in de regio Kop van Noord-Holland vanaf de windparken Doordewind (West)<sup>37</sup> en 6/7. De lengte van het kabeltracé vanaf deze windpark op zee tot aan de potentiële aansluitlocaties in de Kop van Noord-Holland is kort/gemiddeld, wat betekent dat er relatief weinig nieuwe **energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie** nodig is.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat in ieder geval twee aanlandingen aangesloten kunnen worden bij het geplande 380kV-station NNHN-noord. Er is een nadere studie van TenneT nodig om te bepalen of een derde aanlanding aangesloten kan worden.

### Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

<sup>37</sup> Een aanlanding vanuit Doordewind West richting de kop van Noord-Holland is onderzocht in de IEA, maar ondertussen is gebleken dat realisatie hiervan niet haalbaar is.

Een belangrijke factor voor elektrische aanlanding in de Kop van Noord-Holland is de keuze voor twee of vier 380kV-circuits bij het project Netuitbreiding Noord-Holland Noord. Bij twee circuits kan naar verwachting één elektrische aanlanding ingepast worden zonder ingreep aan de afvoerende HS-verbindingen. Bij vier circuits kunnen naar verwachting drie elektrische aanlandingen gerealiseerd worden, bij de ontwikkelingen van de doorgerekende scenario's. Maar de vier circuits zijn alleen nodig bij realisatie van elektrische aanlanding in de Kop van Noord-Holland, dus dit zien we als een grote ingreep. Beide opties, zowel twee als vier circuits, worden onderzocht in de projectprocedure voor de Netuitbreiding Noord-Holland Noord (NNHN).

De aanlandingen in de Kop van Noord-Holland hebben ook impact op de belasting op de 380kV-verbindingen rondom Noord-Holland Zuid. Daarmee zit er een samenhang tussen de mogelijkheden voor aanlanding in de Kop van Noord-Holland en Noord-Holland Zuid. Op basis van de doorrekening lijken in totaal vier aanlandingen à 2 GW en één aanlanding van 700 MW in totaal mogelijk in Noord-Holland als geheel, zonder ingrepen. Een belangrijke onzekerheid hierbij is de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5). Als deze complexe netuitbreiding niet (tijdig) gerealiseerd wordt, dan lijkt maximaal één aanlanding in de kop van Noord-Holland mogelijk zonder grote ingrepen.

#### **Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?**

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marktingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marktingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## **7.3 Beoordeling waterstofverbindingen**

### **7.3.1 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op zee**

Het waterstofnetwerk op zee, dat loopt vanaf elektrolyzers op zee naar de aanlandlocatie in de Kop van Noord-Holland, heeft bij aanlanding in deze regio vergeleken met de andere potentiële aanlandlocaties een **korte lengte**.

### 7.3.2 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op land tot aan nationaal netwerk

Voor het waterstoftransport van aanlandlocatie naar het Waterstofnetwerk Nederland (WNL) is een nieuwe buisleiding van enkele kilometers. De complexiteit van de route voor deze buisleiding is relatief beperkt. Omdat de leidinglengte relatief klein is en de complexiteit beperkt, is de impact van waterstofaanlanding in de Kop van Noord-Holland op dit onderdeel beoordeeld als een **kleine ingreep met weinig risico's**.

### 7.3.3 Benodigde uitbreidingen van het Waterstofnetwerk Nederland

Uit de netwerkanalyse van Gasunie volgt dat er geen extra ingrepen nodig zijn bij het Waterstofnetwerk Nederland als gevolg van de waterstofaanlanding bij de Kop van Noord-Holland, bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn (zie paragraaf 3.5.1). Wel zijn er risico's voor deze aanlanding vanuit de projectplanning van Waterstofnetwerk Nederland. Deze aanlanding is afhankelijk van realisatie van de IJsselmeerroute of de route van Beverwijk naar Den Helder, waarvoor nog geen projectprocedure is gestart en die nog geen P50 of P90-planning<sup>38</sup> heeft. Daarom beoordelen we dit als een **ingreep met gemiddelde risico's**.

### 7.3.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor aanlanding van waterstof in de regio de Kop van Noord-Holland (met aanlandlocatie Kop van Noord-Holland) op de algehele waterstofinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 7-6 Beoordeling waterstofaanlanding in de Kop van Noord-Holland

Effect	Infrastructuur op zee	Infrastructuur op land tot landelijk netwerk	Waterstofnetwerk Nederland
Geen of kleine ingreep en weinig risico's	X	X	
Gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's			X
Grote ingreep of grote risico's			

## 7.4 Beoordeling elektrolyse

### 7.4.1 Aansluitcapaciteit

Grootschalige elektrolyzers moeten worden aangesloten op 380kV-stations. Hier moet voldoende aansluitcapaciteit voor beschikbaar zijn. Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

<sup>38</sup> Dit houdt in dat ingeschat wordt dat het project met respectievelijk 50% of 90% zekerheid op die datum gerealiseerd kan worden.

Er is één potentieel 380kV-stations waar grootschalige elektrolyzers in de Kop van Noord-Holland aangesloten kunnen worden: NNHN-noord. Bij dit geplande station kan naar verwachting **zonder ingrepen** grootschalige elektrolyse aangesloten worden, omdat er op nieuwe stations veel vrije velden beschikbaar zijn. Deze velden kunnen in de toekomst echter ook voor andere klantaanvragen of netuitbreidingen gebruikt worden, dus dit beeld kan nog veranderen.

Tabel 7-7 Beoordeling aansluitcapaciteit elektrolyzers Kop van Noord-Holland

Effect	Station NNHN-noord
Geen ingreep	X
Beperkte ingreep of onzeker	
Grote ingreep	

#### 7.4.2 Impact op hoogspanningsverbindingen

Bij dit effect beoordelen we de impact van grootschalige elektrolyse op de belasting van de hoogspanningsverbindingen. Elektrolyzers hebben een, in veel gevallen positieve, impact op de hoogspanningsverbindingen doordat ze leiden tot extra elektriciteitsvraag bij de aansluitlocaties, waardoor minder elektriciteit afgevoerd dient te worden via de hoogspanningsverbindingen en deze minder belast worden. Dit beoordelen we voor de hele regio.

Grootschalige elektrolyse heeft in de Kop van Noord-Holland (bij realisatie van elektrische aanlanding) een positief effect op de belasting van de hoogspanningsverbindingen, aangezien met name knelpunten op de 380kV-verbindingen plaatsvinden door afvoer van overschotten van windstroom en dat deze minder worden door inzet van grootschalige elektrolyse.

Elektrolyzers kunnen ook nieuwe knelpunten op hoogspanningsverbindingen veroorzaken, als ze ingezet worden op momenten met weinig productie van windparken op zee (maar bijvoorbeeld wel veel zonproductie in andere regio's). Dan leidt inzet van elektrolyzers tot extra transport richting de aansluitlocaties. Als twee 380kV-circuits gerealiseerd worden tussen de Kop van Noord-Holland en het Noordzeekanaalgebied, dan kunnen er problemen ontstaan door transport richting de Kop van Noord-Holland door inzet van elektrolyzers in periodes van onderhoud. Er is dan namelijk geen reserve-component beschikbaar is.

Bovenstaande betekent dat elektrolyzers in de Kop van Noord-Holland naar verwachting een positieve impact hebben op de belasting van hoogspanningsverbindingen, maar mogelijk wel nieuwe problemen kunnen veroorzaken als er twee 380kV-circuits gerealiseerd worden. Het netto effect van de inzet van elektrolyzers is naar verwachting echter wel positief, daarom is de beoordeling **positief**.

Tabel 7-8 Beoordeling impact elektrolyzers op HS-verbindingen Kop van Noord-Holland

Score	Effect	Impact op HS-verbindingen
++	Zeer positief	
+	Positief	X
0	Neutraal	

#### 7.4.3 Impact op waterstofinfrastructuur

De waterstof die geproduceerd met de elektrolyzers zal afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk (en deels lokaal benut worden). Het is de verwachting dat het voorziene

waterstofnetwerk hiervoor voldoende capaciteit heeft en dat er geen ingreep bij de waterstofinfrastructuur nodig is om grootschalige elektrolyse in de Kop van Noord-Holland mogelijk te maken (bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn, zie paragraaf 3.5.1). Dat geldt ook bij combinatie met waterstofaanlanding.

Realisatie van grootschalige elektrolyse bij de kop van Noord-Holland is wel afhankelijk van realisatie van de IJsselmeerroute of de route van Beverwijk naar Den Helder van het Waterstofnetwerk Nederland, waarvoor nog geen projectprocedure is gestart en die nog geen P50 of P90-planning<sup>39</sup> heeft.

Tabel 7-9 Beoordeling impact elektrolyzers waterstofinfrastructuur Kop van Noord-Holland

Effect	Impact op waterstofinfrastructuur
Geen ingreep	X
Beperkte ingreep	
Grote ingreep	

#### 7.4.4 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving. In de omgeving van de potentiële aansluitlocaties in de Kop van Noord-Holland wonen weinig mensen en is de warmtevraag van de gebouwde omgeving dus beperkt. Ook zijn er weinig buurten in de omgeving waarvoor een warmtenet de laagste nationale kosten heeft volgens de [startanalyse 2020](#). Dit betekent dat er naar verwachting ook geen potentieel is voor benutting van deze restwarmte in de regio.

Er is wel een grote warmtevraag van de glastuinbouw in de kop van Noord-Holland. Mogelijk kan de restwarmte van elektrolyzers daar wel benut worden, maar hier is nog verder onderzoek naar nodig. Daarom is de beoordeling **neutraal**.

Tabel 7-10 Beoordeling mogelijkheid benutting restwarmte Kop van Noord-Holland

Score	Effect	Mogelijkheid benutting restwarmte
+	Positief	
0	Neutraal	X
-	Negatief	

#### 7.4.5 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse pVAWOZ

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

<sup>39</sup> Dit houdt in dat ingeschat wordt dat het project met respectievelijk 50% of 90% zekerheid op die datum gerealiseerd kan worden.

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>40</sup>.
- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vergelijking van de huidige plannen met de aannames in de scenario's. In de Kop van Noord-Holland zijn er nog geen (concrete) plannen voor grootschalige elektrolyse. Bij elektrische aanlanding van wind op zee in deze regio is wel grootschalige elektrolyse wenselijk.

Tabel 7-11 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Kop van Noord-Holland	0 MW	400 – 1.750 MW <sup>41</sup>	100 – 900 MW

#### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

#### 7.4.6 Conclusies

De beoordeling van grootschalige elektrolyse in de Kop van Noord-Holland is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 7-12 Beoordeling elektrolyzers de Kop van Noord-Holland

Beoordeeld effect	Station NNHN-noord
Aansluitcapaciteit	Geen ingreep
Impact op HS-verbindingen	Positief
Impact op waterstofinfrastructuur	Geen ingreep, wel afhankelijk van realisatie specifieke projecten WNL waarvoor projectprocedure nog moet starten.
Mogelijkheid benutting restwarmte	Neutraal
Bestaande plannen en noodzaak meer elektrolyse	Meer elektrolyse bovenop bestaande plannen wenselijk

<sup>40</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

<sup>41</sup> Dit is bij minimaal 1 elektrische verbinding. Zonder elektrische verbinding in Noord-Holland Noord is grootschalige elektrolyse vanuit systeemperspectief niet nuttig.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat grootschalige elektrolyse naar verwachting aangesloten kan worden op het geplande 380kV-station bij NNHN-noord. Daarnaast kan de geproduceerde waterstof naar verwachting afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk, zonder significante uitbreidingen. Dit betekent dat het naar verwachting **mogelijk** is om grootschalige elektrolyse te realiseren in de regio zonder forse uitbreidingen van de energie-infrastructuur (bovenop geplande uitbreidingen). Realisatie van grootschalige elektrolyse bij de kop van Noord-Holland is wel afhankelijk van realisatie van de IJsselmeerroute of de route van Beverwijk naar Den Helder van het Waterstofnetwerk Nederland, waarvoor nog geen projectprocedure is gestart en die nog geen P50 of P90-planning<sup>42</sup> heeft.

Grootschalige elektrolyse in de regio heeft naar verwachting een zeer positieve impact op de belasting van hoogspanningsverbindingen, indien aanlanding van wind op zee gerealiseerd wordt in de Kop van Noord-Holland, en kan daarmee bijdragen aan de integratie van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet. Daarmee is grootschalige elektrolyse in de regio ook **gunstig**, bij elektrische aanlanding van wind op zee. Een nadeel is wel dat de restwarmte die geproduceerd wordt door elektrolyzers naar verwachting niet benut kan worden in de gebouwde omgeving in de regio. Mogelijk is benutting van de restwarmte in de glastuinbouw sector wel een optie, maar daar is meer onderzoek naar nodig.

In de Kop van Noord-Holland zijn er nog geen (concrete) plannen voor grootschalige elektrolyse (althans geen publiek bekende initiatieven, zie tekstbox in paragraaf 7.4.5).

## 7.5 Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers

De elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen en verminderen de belasting op de HS-verbindingen. Bij beide doorgerekende scenario's, met een verschillende hoeveelheid elektrolyse op land, kunnen echter wel evenveel elektrische aanlandingen ingepast worden zonder grote ingreep. Dit betekent dat de extra elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap (ten opzichte van het scenario Europese Integratie) niet zo'n grote impact heeft dat een extra elektrische aanlanding mogelijk is. Daarbij moet wel benoemd worden dat ook het scenario Europese Integratie, met relatief weinig elektrolyse en elektrificatie, uitgaat van een toename van elektrolyse en overige elektriciteitsvraag ten opzichte van de huidige plannen. Als er nog minder elektrolyse en/of elektrificatie dan in dit scenario komt, dan kan dat wel betekenen dat minder elektrische aanlandingen ingepast kunnen worden.
- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aanlanding, hoe meer elektrolyse gewenst is en vice versa. Er wordt in de doorrekening uitgegaan maximaal 900 tot 1.750 MW elektrolyse, bij drie elektrische aanlandingen in de regio. Deze inschatting is gemaakt met de modellering van ii3050. In deze modellering is een inschatting gemaakt van een efficiënte hoeveelheid aan elektrolyzers, in Nederland en per regio, op basis van de lokale balans van vraag en aanbod.

---

<sup>42</sup> Dit houdt in dat ingeschat wordt dat het project met respectievelijk 50% of 90% zekerheid op die datum gerealiseerd kan worden.

- Dezelfde waterstofleidingen worden gebruikt voor het transport van waterstofaanbod van grootschalige elektrolyse op land en waterstofaanlandingen richting het Waterstofnetwerk Nederland en via het Waterstofnetwerk Nederland richting de rest van Nederland. In de Kop van Noord-Holland heeft het voorziene Waterstofnetwerk Nederland voldoende capaciteit om beide ontwikkelingen te faciliteren.

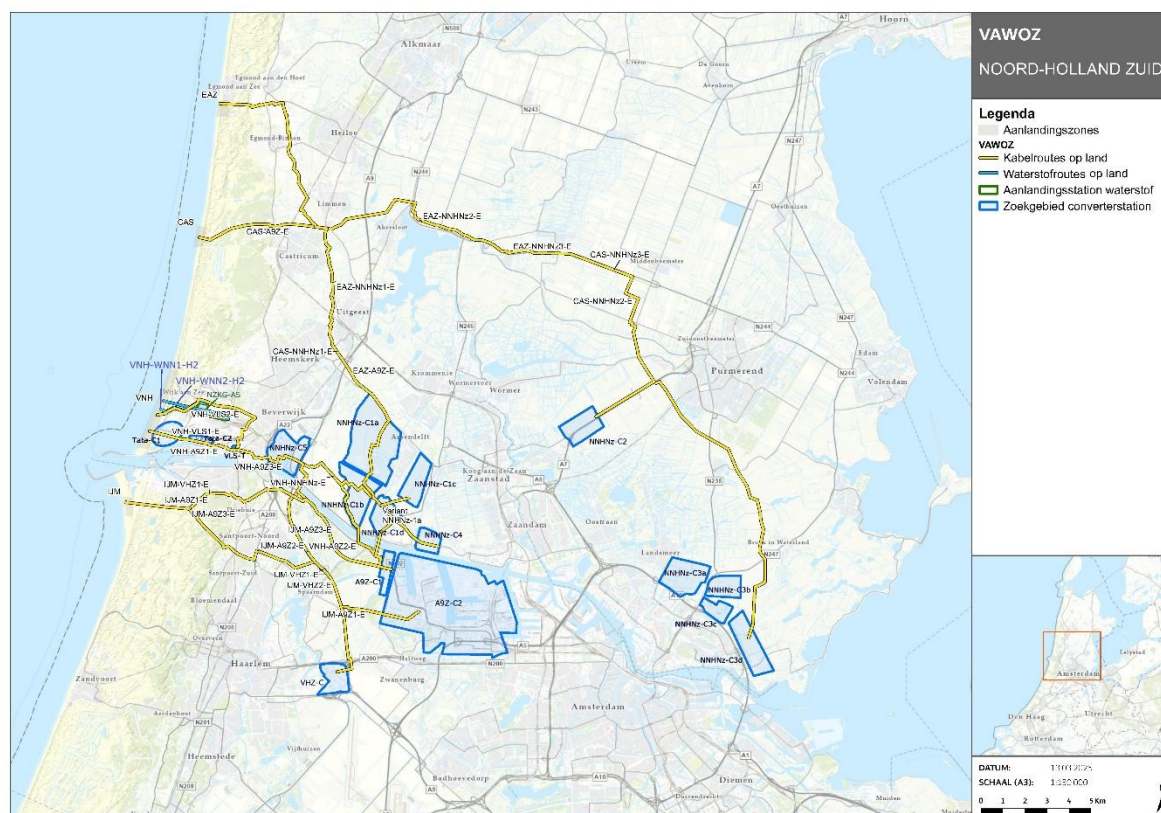
## 8 Beoordeling Noord-Holland Zuid

### 8.1 Omschrijving regio

#### 8.1.1 Potentiële routes en aansluitlocaties

In Figuur 8-1 staan de potentiële elektrische routes en waterstofroutes voor de regio Noord-Holland Zuid. De elektrische routes lopen naar vier aansluitlocaties. Dit zijn het bestaande 380kV-station met aansluitcapaciteit (Vijfhuizen), of zicht op uitbreiding/capaciteit (150kV-station Velsen), en twee toekomstige 380kV-stations (A9-Zuid en Netuitbreiding Noord-Holland Noord (NNHN)-zuid). Bij station Velsen kan alleen een 700 MW AC-verbinding aanlanden. Bij de overige stations 2 GW DC-verbindingen.

De waterstofroute komt aan land in de aanlandingszone Velsen-Noord - Heemskerk en loopt daarna in een rechte lijn richting het toekomstige Waterstofnetwerk Noordzeekanaalgebied (NZKG), waar het aansluit op Waterstofnetwerk Nederland. Voor een aanlandingsstation voor waterstof is een zoekgebied in beeld nabij het transformatorstation Wijk aan Zee van TenneT.



Figuur 8-1 Elektrische en waterstofroutes in Noord-Holland Zuid

#### 8.1.2 Relevante aspecten voor systeemintegratie

In het Noordzeekanaalgebied (NZKG) zal bij Beverwijk vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW ruim 2 GW elektrische aanlanding van wind op zee gerealiseerd worden. Vanaf 380kV-station Beverwijk loopt een 380 kV-verbinding met twee 380kV-circuits richting Diemen door het NZKG. Bij Diemen takt deze verbinding aan op de lus van het 380 kV-net. Daarnaast loopt er een 380 kV-

verbinding vanaf Beverwijk richting Vijfhuizen en Bleiswijk. In de eerste jaren van de jaren '30 wordt een 380 kV-verbinding vanaf de Kop van Noord-Holland richting Noord-Holland Zuid gerealiseerd. Daarnaast wordt in de analyses uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker.

De onderstaande tabel geeft de kerncijfers voor vraag, aanbod en flexibiliteit in de regio Noord-Holland Zuid. De elektriciteitsvraag in de regio zal in 2040 naar verwachting 26 tot 29 TWh per jaar zijn, wat overeenkomt met gemiddeld 3 tot 3,3 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW nog niet voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag. Maar bij realisatie van één of twee elektrische aanlandingen van 2 GW zal wel windstroom doorgevoerd worden richting de rest van Nederland. Daarnaast is er ook opwek van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De vraag is daarmee hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

Tabel 8-1 Kerncijfers vraag, aanbod en flexibiliteit Noord-Holland Zuid<sup>43</sup>

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
<b>Vraag en aanbod</b>		
<i>Elektriciteitsvraag</i>	29 TWh/3,3 GW	26 TWh/3 GW
<i>Wind op land</i>	50 MW	150 MW
<i>Zon-pv</i>	1.150 MW	2.700 MW
<b>Flexibiliteit (afhankelijk van hoeveelheid elektrische aanlanding)</b>		
<i>Elektrolyzers</i>	650 tot 700 MW	350 tot 400 MW

De belangrijkste factoren die impact hebben op het aantal elektrische aanlandingen dat in Noord-Holland Zuid mogelijk is zijn:

- **Ontwikkeling elektrolyzers.** Deze zetten lokaal overschotten van elektriciteit om in waterstof, zodat deze niet doorgevoerd hoeven te worden richting de rest van Nederland. In beide scenario's is uitgegaan van een aanzienlijk vermogen aan elektrolyzers. Als deze niet gerealiseerd worden, dan zullen minder elektrische aanlandingen mogelijk zijn. De ontwikkeling van elektrolyse verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse is in meer detail naar de wisselwerking tussen elektrolyse en wind op zee gekeken (paragraaf 5.2).
- **Ontwikkeling van de elektriciteitsvraag van Noordzeekanaalgebied.** Bij minder elektriciteitsvraag, bijvoorbeeld door krimp/vertrek van lokale industrie, is minder elektrische aanlanding mogelijk. Bij meer elektriciteitsvraag is meer elektrische aanlanding mogelijk. De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag verschilt tussen beide scenario's en in en in een gevoeligheidsanalyse hebben we specifiek gekeken naar de plannen van de CES (paragraaf 5.3).
- **Wisselwerking met Kop van Noord-Holland.** Overschotten van wind vanuit de Kop van Noord-Holland worden via Noord-Holland Zuid afgevoerd richting de rest van Nederland, als daar aanlanding gerealiseerd wordt. Als er geen aanlanding gerealiseerd wordt in de kop van Noord-Holland, dan kunnen de overschotten vanuit Noord-Holland Zuid deels afgevoerd worden richting de Kop van Noord-Holland.

<sup>43</sup> De geografische afbakening bij deze cijfers is de provincie Noord-Holland minus de veiligheidsregio Noord-Holland Noord.

- **Ontwikkeling netuitbreiding Randstad.** In de analyses wordt uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker. We hebben de situatie zonder deze netuitbreiding in de Randstad onderzocht in een gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 5.5).

Bij de potentiële waterstofaanlanding in Noord-Holland Zuid zal waterstof via Waterstofnetwerk Noordzeekanaalgebied getransporteerd worden naar het landelijke waterstofnetwerk. Voor de waterstofaanlanding is ook de capaciteit van elektrolyse op land van belang. De geproduceerde waterstof van elektrolyse op land zal namelijk via dezelfde buisleidingen getransporteerd worden. Daarnaast is de ontwikkeling van de waterstofvraag in het Noordzeekanaalgebied belang, aangezien daar potentieel een grote waterstofvraag kan ontstaan.

## 8.2 Beoordeling elektrische aanlandingen

### 8.2.1 Benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Er zijn verschillende mogelijke elektrische routes richting de vier aansluitlocaties in de regio Noord-Holland Zuid. Richting het 380kV-station NNHN-zuid, A9-Zuid en Vijfhuizen vanaf windpark 6/7 en richting 150kV-station Velsen vanaf Hollandse Kust West.

Vergeleken met de andere potentiële aansluitlocaties hebben de alternatieven vanaf Hollandse Kust West richting Noord-Holland Zuid een **korte lengte**. Bij de routes vanaf 6/7 richting station is het afhankelijk van de specifieke route en de aansluitlocatie, enkele potentiële routes hebben een **korte lengte** en enkele een **gemiddelde lengte**.

Tabel 8-2 Beoordeling benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen Noord-Holland Zuid

Effect	NNHN Zuid – vanaf 6/7	Velsen – vanaf HKW	A9-Zuid – vanaf 6/7	Vijfhuizen – vanaf 6/7
Korte lengte	X	X	X	X
Gemiddelde lengte	X		X	X
Grote lengte				

### 8.2.2 Aansluitcapaciteit

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang.

Hierbij maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in de regio Noord-Holland Zuid vier potentiële aansluitlocaties. Dit zijn het bestaande 380kV-station Vijfhuizen, het bestaande 150kV-station Velsen, en twee geplande 380kV-stations A9-Zuid en Netuitbreiding Noord-Holland Noord (NNHN)-zuid. Bij station Velsen kan alleen een 700 MW AC-verbinding aanlanden. Bij de overige stations 2 GW DC-verbindingen.

Bij het bestaande 380kV-station Vijfhuizen kan naar verwachting tot één elektrische aanlanding van 2 GW aangesloten worden. Hiervoor zijn wel uitbreidingen binnen het station nodig en of deze aanlanding aangesloten kan worden is afhankelijk van toekomstige klantaanvragen. Bij meer dan één elektrische aanlanding is een nieuw station nodig, wat een **grote ingreep** is.

Bij het bestaande 150kV-station Velsen kan naar verwachting tot één elektrische aanlanding van 700 MW aangesloten worden, bij uitbreiding binnen het station. Of deze aanlanding aangesloten kan worden is afhankelijk van de sluiting van de Vattenfall-centrales. Daarnaast is er nog onderzoek nodig naar de netkwaliteit. De haalbaarheid van aansluiting bij dit station is dus onzeker.

Bij de beide geplande stations A9-Zuid en NNHN-zuid kan **zonder grote ingrepen** één elektrische aanlanding aangesloten worden. Mogelijk kunnen meer elektrische aanlandingen aangesloten worden, maar dit is afhankelijk van het definitieve ontwerp van het station en is dus onzeker. Hier wordt bij het ontwerp wel rekening gehouden. Bij meer dan drie aanlandingen zal in ieder geval een nieuw station noodzakelijk zijn.

De onderstaande capaciteit geeft het overzicht van de beoordeling van de aansluitcapaciteit van stations voor elektrische aanlanding in Noord-Holland Zuid.

Tabel 8-3 Beoordeling aansluitcapaciteit stations Noord-Holland Zuid

Effect	Station NNHN-zuid	Station Velsen	Station A9-Zuid	Station Vijfhuizen
Geen ingreep	Tot één aanlanding van 2 GW		Tot één aanlanding van 2 GW	
Beperkte ingreep of onzeker	Mogelijk meer dan één, afhankelijk van definitief ontwerp	Tot één aanlanding van 700 MW	Mogelijk meer dan één, afhankelijk van definitief ontwerp	Tot één aanlanding van 2 GW
Grote ingreep	Meer dan drie aanlandingen		Meer dan drie aanlandingen	Meer dan één aanlanding

### 8.2.3 Impact op afvoerende 380kV-verbindingen

De elektriciteit van de windparken op zee wordt deels in de regio gebruikt, maar wordt grotendeels doorgevoerd via hoogspanningsverbindingen. Bij dit effect beoordelen we de impact van de aanlanding van wind op zee op deze verbindingen en de ingrepen die nodig zijn om de windenergie af te voeren. Hierbij maken we onderscheid tussen drie soorten ingrepen (meer toelichting in paragraaf 3.4.4):

- Geen ingreep noodzakelijk.
- Een operationele ingreep, met redispatch. Dit is een beperkte ingreep.
- Een grote ingreep. Zoals netverzwaring, systeemoplossing of een marketingreep (zie paragraaf 3.4.4).

Vanaf Beverwijk loopt een 380 kV-verbinding met twee 380kV-circuits richting Diemen door het NZKG. Bij Diemen takt deze verbinding aan op de lus van het 380 kV-net. Daarnaast loopt een 380 kV-verbinding vanaf Beverwijk richting Vijfhuizen en Bleiswijk en vervolgens Krimpen. In de eerste

jaren van de jaren '30 wordt een 380 kV-verbinding vanaf de Kop van Noord-Holland richting Noord-Holland Zuid gerealiseerd. Tot slot wordt in de analyses de aanleg van een nieuwe 380kV-verbinding vanaf Maasvlakte Amaliahaven naar Diemen en vervolgens Beverwijk meegenomen. Hier wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en is daarom nog onzeker.

De elektriciteitsvraag is gemiddeld 3 tot 3,3 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding uit de routekaart windenergie op zee 21 GW nog niet voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag. Maar bij realisatie van één of twee elektrische aanlandingen van 2 GW zal wel windstroom doorgevoerd worden richting de rest van Nederland. Daarnaast is er ook opwek van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De vraag is hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

Hierbij is ook de aanlanding in de Kop van Noord-Holland van belang. Overschotten van wind vanuit de Kop van Noord-Holland worden via Noord-Holland Zuid afgevoerd richting de rest van Nederland. Als er geen aanlanding gerealiseerd wordt in de kop van Noord-Holland, dan kunnen de overschotten vanuit Noord-Holland Zuid deels afgevoerd worden richting de Kop van Noord-Holland.

In de doorrekeningen zijn configuraties met één aanlanding van 700 MW (bij Velsen) en nul tot twee aanlandingen van 2 GW in Noord-Holland Zuid (twee tot vier aanlandingen van 2 GW in Noord-Holland als geheel), bovenop de routekaart windenergie op zee 21 GW, doorgerekend voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, zie paragraaf 1.3.1). Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor de Randstad uitbreiding, de energievraag van de industrie en de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibiliteit.

De conclusies over de impact van elektrische aanlanding op de afvoerende 380kV-verbindingen zijn:

- Er zijn **geen ingrepen** voor de hoogspanningsverbindingen nodig tot twee aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW in Noord-Holland Zuid (en tot 4 aanlandingen van 2 GW plus één aanlanding van 700 MW in Noord-Holland als geheel)<sup>44</sup>. Dit geldt voor beide energetische scenario's.
- Het is onzeker wat de effecten zijn bij meer aanlanding, in Noord-Holland Zuid of in Noord-Holland als geheel, aangezien dit niet doorgerekend is door TenneT.
- Een belangrijke onzekerheid voor aanlanding in Noord-Holland is de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5). Als deze complexe netuitbreiding niet (tijdig) gerealiseerd wordt, dan is aanlanding in de Randstad uitdagend en lijkt maximaal één elektrische aanlanding van 2 GW mogelijk in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland zonder grote ingreep. Of er daarbovenop nog een aanlanding van 700 MW bij Velsen inpasbaar is zonder grote ingreep is onzeker. Er kan in plaats van een aanlanding van 2 GW uiteraard wel een aanlanding van 700 MW ingepast worden.

Dit is bovenop de ene aanlanding die mogelijk lijkt in de Kop van Noord-Holland (zie paragraaf 6.2.3). De Netuitbreiding Randstad wordt ook besproken in de beoordeling *Toekomstvastheid en Tijd*.

---

<sup>44</sup> Uit de doorrekeningen van TenneT volgt dat in alle scenario's en configuraties knelpunten ontstaan op de 380kV-verbinding tussen Vijfhuizen en A9-Zuid. Echter, deze uitkomsten lijken door specifieke (en onlogische) aannames in de doorrekening van TenneT te komen. We verwachten dat deze knelpunten in de praktijk niet zullen optreden. Daarom wegen we dit niet mee bij de beoordeling.

- In de CES 3.0 van het Noordzeekanaalgebied wordt uitgegaan van 5 TWh meer elektriciteitsvraag uit industrie en van elektrolyse dan in de doorgerekende scenario's. Dit komt overeen met ongeveer 0,6 GW extra vraag. Hierdoor kan iets meer aanbod van wind op zee lokaal benut worden en kan er mogelijk iets meer wind op zee aanlanden, maar of dit ertoe leidt dat een extra elektrische verbinding (à 2 GW) ingepast kan worden, is onzeker.

Tabel 8-4 Beoordeling impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen Noord-Holland Zuid

Effect	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Geen netuitbreiding Randstad
Geen ingreep	Twee aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW	Twee aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW	
Beperkte ingreep			Eén aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland
Grote ingreep			Meer dan één aanlanding

## 8.2.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor elektrische aanlanding in de regio Noord-Holland Zuid op de algehele elektriciteitsinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 8-5 Beoordeling elektrische aanlandingen Noord-Holland Zuid

Beoordeeld effect	Station NNHN-zuid	Station Velsen	Station A9-Zuid	Station Vijfhuizen
<b>Energie-infrastructuur tot aansluitlocatie</b>	Korte of gemiddelde lengte	Gemiddelde lengte	Korte of gemiddelde lengte	Korte of gemiddelde lengte
<b>Aansluitcapaciteit</b>	Geen ingreep bij één aanlanding. Tot maximaal drie aanlandingen, bij aanpassing stations ontwerp. Zware ingreep bij meer dan drie aanlandingen.	Beperkte ingreep bij één aanlanding (van 700 MW).	Geen ingreep bij één aanlanding. Tot maximaal drie aanlandingen, bij aanpassing stations ontwerp. Zware ingreep bij meer dan drie aanlandingen.	Beperkte ingreep bij één aanlanding. Zware ingreep bij meer dan één aanlanding.
<b>Impact op afvoerende HS-verbindingen</b>	Twee aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW zonder grote ingreep. Onzekerheid door de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5), zonder deze uitbreiding is aanlanding in Randstad uitdagend en lijkt één aanlanding mogelijk in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland mogelijk zonder grote ingreep.			

Er zijn potentiële routes voor elektrische aanlandingen in de regio Noord-Holland Zuid vanaf de windparken Hollandse Kust West en 6/7. De lengte van het kabeltracé vanaf deze windpark op zee tot aan de potentiële aansluitlocaties in Noord-Holland Zuid is kort of gemiddeld (afhankelijk van het specifieke tracé), wat betekent dat er relatief weinig nieuwe **energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie** nodig is. Met name bij de routes vanaf Hollandse Kust West.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat bij de beide nieuwe stations A9-Zuid en NNHN-zuid naar verwachting één nieuwe elektrische aanlanding aangesloten kan worden, zonder ingrepen. Mogelijk kunnen meer elektrische aanlandingen aangesloten worden, maar dit is afhankelijk van het definitieve ontwerp van het station en is dus onzeker. Met ingrepen binnen het station kan ook op de bestaande stations Vijfhuizen en Velsen één aanlanding gerealiseerd worden. Bij station Velsen kan alleen een aanlanding van 700 MW gerealiseerd worden, aangezien dit een 150kV-station is.

Er kunnen, bij de ontwikkelingen van de doorgerekende scenario's, naar verwachting minimaal twee elektrische aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW in Noord-Holland Zuid gerealiseerd worden zonder dat ingrepen bij de **HS-verbindingen** nodig zijn.

**Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid**

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

De mogelijkheden voor elektrische aanlanding van wind op zee in Noord-Holland Zuid zijn ook afhankelijk van de aanlanding in de Kop van Noord-Holland, dit zijn communicerende vaten. Bij de doorgerekende scenario's (met maximaal vier aanlandingen van 2 GW en één van 700 MW in Noord-Holland als geheel) zijn geen grote ingrepen nodig aan de **HS-verbindingen** richting de rest van Nederland<sup>45</sup> (bij realisatie Netuitbreiding in de Randstad).

Een belangrijke onzekerheid hierbij is de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5). Als deze complexe netuitbreiding niet (tijdig) gerealiseerd wordt, dan is aanlanding in de Randstad uitdagend en lijkt maximaal één elektrische aanlanding van 2 GW mogelijk in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland zonder grote ingreep. Dit is bovenop de ene aanlanding die mogelijk lijkt zonder grote ingreep in de Kop van Noord-Holland (zie paragraaf 6.2.3).

---

<sup>45</sup> Om 4 elektrische aanlandingen aan te kunnen sluiten in Noord-Holland zijn mogelijk wel een derde en vierde circuit tussen Kop van Noord-Holland en Noord-Holland Zuid nodig. Zie hiervoor de beoordeling voor Kop van Noord-Holland (hoofdstuk 6).

### Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marketingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marketingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## 8.3 Beoordeling waterstofverbindingen

### 8.3.1 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op zee

Het waterstofnetwerk op zee, dat loopt vanaf elektrolyzers op zee naar de aanlandlocatie in het Noordzeekanaalgebied (NZKG), heeft vergeleken met de andere potentiële aanlandlocaties een **korte lengte**.

### 8.3.2 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op land tot aan nationaal netwerk

Voor het waterstoftransport van aanlandlocatie naar het Waterstofnetwerk Nederland (WNL) is een nieuwe buisleiding met een lengte van enkele kilometers nodig. De complexiteit voor het realiseren van deze buisleiding is relatief groot doordat het een druk gebied is met veel ontwikkelingen, waardoor er weinig ruimte is in de ondergrond. Omdat de complexiteit van deze route groot is hebben we deze beoordeeld als een **ingreep met grote risico's**.

### 8.3.3 Benodigde uitbreidingen van het Waterstofnetwerk Nederland

Uit de netwerkanalyse van Gasunie volgt dat er geen nieuwe netwerkcomponenten nodig zijn bij het Waterstofnetwerk Nederland als gevolg van de waterstofaanlanding bij het Noordzeekanaalgebied, bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn (zie paragraaf 3.5.1). Er zijn daarnaast weinig risico's vanuit de projectplanning van Waterstofnetwerk Nederland.

Er kan wel slechts een beperkte capaciteit ingepast worden bij waterstofaanlanding in Noord-Holland Zuid (max 8-10 GW), maar dit is voldoende voor de onderzoeksopgave van pVAWOZ voor 2040. Dit kan wel een probleem worden bij verdere uitrol van wind op zee en offshore elektrolyse na 2040. Hier gaan we op in bij de beoordeling *Toekomstvastheid en Tijd*.

### 8.3.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor aanlanding van waterstof in de regio Noord-Holland Zuid (met aanlandlocatie Noordzeekanaalgebied) op de algehele waterstofinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 8-6 Beoordeling impact waterstofaanlanding in Noord-Holland Zuid op waterstofinfrastructuur

Effect	Infrastructuur op zee	Infrastructuur op land tot landelijk netwerk	Waterstofnetwerk Nederland
Geen ingreep/korte lengte en weinig risico's	X		X
Beperkte/gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's			
Grote ingreep of grote risico's		X	

## 8.4 Beoordeling elektrolyse

### 8.4.1 Aansluitcapaciteit

Grootschalige elektrolyzers moeten worden aangesloten op hoogspanningsstations. Hier moet voldoende aansluitcapaciteit voor beschikbaar zijn. Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in de regio Noord-Holland Zuid drie potentiële 380kV-stations, de geplande stations A9-Zuid en NNHN-zuid en het bestaande station Vijfhuizen, en één 150kV-station, het bestaande station Velsen.

Bij de geplande 380kV-stations A9-Zuid en NNHN-zuid kan naar verwachting grootschalige elektrolyse aangesloten worden zonder ingrepen, omdat er op de nieuwe stations veel vrije velden beschikbaar zijn. Deze velden kunnen in de toekomst echter ook voor andere klantaanvragen of netuitbreidingen gebruikt worden, dus dit beeld kan nog veranderen.

Bij het bestaande 380kV-station Vijfhuizen zijn weinig vrije velden beschikbaar om nieuwe afnemers aan te sluiten en is de kans aanwezig dat deze velden voor andere klantaanvragen of voor netuitbreidingen nodig zijn. Dat betekent dat het momenteel onzeker is of het aansluiten van grootschalige elektrolyse (groter dan 500 MW) mogelijk is. Dit geldt ook bij uitbreiding van dit bestaande station. Gedetailleerder onderzoek op stationsniveau is noodzakelijk om te bepalen wat mogelijk is bij dit station. Indien een aansluiting op het 380kV-station niet mogelijk is, dan kan het een optie zijn om een kleiner vermogen aan elektrolyse (kleiner dan 500 MW) aan te sluiten op een onderliggend 150kV-station, maar ook dit dient per station onderzocht te worden.

Bij het 150kV-station Velsen is het nog onzeker of een elektrolyser aangesloten kan worden en aangezien het een 150kV-station is kan een fors kleiner vermogen aan elektrolyzers aangesloten worden dan bij een 380kV-station (maximaal 500 MW).

Tabel 8-7 Beoordeling aansluitcapaciteit elektrolyzers stations Noord-Holland Zuid

Effect	380kV-station NNHN-zuid	150kV-station Velsen	380kV-station A9-Zuid	380kV-station Vijfhuizen
Geen ingreep	X		X	
Beperkte ingreep of onzeker				
Grote ingreep		X		X

### 8.4.2 Impact op hoogspanningsverbindingen

Bij dit effect beoordelen we de impact van grootschalige elektrolyse op de belasting van de hoogspanningsverbindingen. Elektrolyzers hebben een, in veel gevallen positieve, impact op de hoogspanningsverbindingen doordat ze leiden tot extra elektriciteitsvraag bij de aansluitlocaties, waardoor minder elektriciteit afgevoerd dient te worden via de hoogspanningsverbindingen en deze minder belast worden. Dit beoordelen we voor de hele regio.

Grootschalige elektrolyse heeft in de Noord-Holland Zuid (bij realisatie van extra elektrische aanlanding) een positief effect op de belasting van de hoogspanningsverbindingen, aangezien met name knelpunten op de 380kV-verbindingen plaatsvinden door afvoer van overschotten van windstroom en dat deze minder worden door inzet van grootschalige elektrolyse.

Elektrolyzers kunnen ook nieuwe knelpunten op hoogspanningsverbindingen veroorzaken, als ze ingezet worden op momenten met weinig productie van windparken op zee (maar bijvoorbeeld wel veel zon). Dan leidt inzet van elektrolyzers tot extra transport richting de aansluitlocaties. Dit kan in de regio Noord-Holland Zuid tot nieuwe knelpunten leiden. Het netto effect van de inzet van elektrolyzers is naar verwachting echter wel positief.

Aangezien het netto effect van de inzet van elektrolyzers is naar verwachting positief is, en elektrolyse kan bijdragen aan de inpassing van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet, is de beoordeling **positief**.

Tabel 8-8 Beoordeling impact elektrolyzers op HS-verbindingen Noord-Holland Zuid

Score	Effect	Impact op HS-verbindingen
++	Zeer positief	
+	Positief	X
0	Neutraal	

### 8.4.3 Impact op waterstofinfrastructuur

De waterstof die geproduceerd met de elektrolyzers zal afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk (en deels lokaal benut worden). Het is de verwachting dat geplande WNL hiervoor voldoende capaciteit heeft en dat er **geen ingreep** bij de waterstofinfrastructuur nodig is om grootschalige elektrolyse in Noord-Holland Zuid mogelijk te maken (bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn, zie paragraaf 3.5.1). Dit geldt ook bij combinatie met waterstofaanlanding.

De waterstofleidingen in Noord-Holland Zuid hebben echter wel een beperkte capaciteit (max 8-10 GW). Bij een grotere capaciteit (van elektrolyse op land en eventuele waterstofaanlanding gezamenlijk) zijn wel ingrepen nodig.

Tabel 8-9 Beoordeling impact elektrolyzers waterstofinfrastructuur Noord-Holland Zuid

Effect	Impact op waterstofinfrastructuur
Geen ingreep	X
Beperkte ingreep of onzeker	
Grote ingreep	

#### 8.4.4 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving. In de omgeving van de potentiële aansluitlocaties in Noord-Holland Zuid wonen veel mensen en is de warmtevraag van de gebouwde omgeving dus groot. Ook zijn er veel buurten in de omgeving waarvoor een warmtenet de laagste nationale kosten heeft volgens de startanalyse 2020. Dit betekent dat er naar verwachting potentieel is voor benutting van de restwarmte in de regio. Daarom is de beoordeling **positief**.

Met name volgende aansluitlocaties zijn interessant voor de benutting van restwarmte:

1. A9-Zuid nabij Haarlem: Haarlem heeft een grote warmtevraag en is nabijgelegen.
2. Velsen: Beverwijk heeft een stuk minder warmtevraag dan Haarlem, maar is gunstig gelegen nabij aansluitlocatie Velsen.
3. A9-Zuid nabij Amsterdam: Amsterdam heeft een grote behoefte aan warmte, maar is verder gelegen van deze aansluitlocatie dan bijvoorbeeld Haarlem.

Tabel 8-10 Beoordeling mogelijkheid benutting restwarmte Noord-Holland Zuid

Score	Effect	Mogelijkheid benutting restwarmte
+	Positief	X
0	Neutraal	
-	Negatief	

#### 8.4.5 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse pVAWOZ

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>46</sup>.

<sup>46</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vergelijking van de huidige plannen met de aannames in de scenario's. In Noord-Holland Zuid is de bovengrens van de huidige plannen al vrijwel gelijk aan de aannames in de scenario's. Dit zijn echter nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is.

Tabel 8-11 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Noord-Holland Zuid	0 – 600 MW	650 – 700 MW	400 MW

#### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

#### 8.4.6 Conclusies

De beoordeling van grootschalige elektrolyse in Noord-Holland Zuid is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 8-12 Beoordeling elektrolyzers Noord-Holland Zuid

Beoordeeld effect	Station NNHN-zuid	Station Velsen	Station A9-Zuid	Station Vijfhuizen
Aansluitcapaciteit	Geen ingreep	Grote ingreep	Geen ingreep	Grote ingreep
Impact op HS-verbindingen	Positief			
Impact op waterstofinfrastructuur	Geen ingreep			
Mogelijkheid benutting restwarmte	Positief			
Bestaande plannen en noodzaak meer elektrolyse	Geen elektrolyse bovenop bestaande plannen wenselijk, maar bestaande plannen nog onzeker.			

Grootschalige elektrolyse kan naar verwachting aangesloten worden op het geplande 380kV-station bij A9-zuid en het geplande 380kV-station NNHN-zuid. Daarnaast kan de geproduceerde waterstof

wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

naar verwachting afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk, zonder grote ingrepen. Dit betekent dat het naar verwachting **mogelijk** is om grootschalige elektrolyse te realiseren in de regio zonder forse uitbreidingen van de energie-infrastructuur (bovenop geplande uitbreidingen).

Grootschalige elektrolyse in de regio heeft naar verwachting een positieve impact op de belasting van hoogspanningsverbindingen en kan daarmee bijdragen aan de integratie van elektrische aansluitingen in het hoogspanningsnet, maar kan ook nieuwe knelpunten op het hoogspanningsnet veroorzaken. Het netto-effect is echter positief. Daarmee is grootschalige elektrolyse in de regio ook **gunstig**, bij elektrische aansluiting van wind op zee. De restwarmte, die geproduceerd wordt door elektrolyzers, kan naar verwachting benut worden in de regio.

In Noord-Holland Zuid is de bovengrens van de huidige plannen voor elektrolyzers al vrijwel gelijk aan de aannames in de scenario's. Dit zijn echter nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is.

## 8.5 Samenhang tussen elektrische aansluitingen, waterstofaansluitingen en elektrolyzers

De elektrische aansluitingen, waterstofaansluitingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aansluitingen en verminderen de belasting op de HS-verbindingen. Bij beide doorgerekende scenario's, met een verschillende hoeveelheid elektrolyse op land, kunnen echter wel evenveel elektrische aansluitingen ingepast worden zonder grote ingreep. Dit betekent dat de extra elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap (ten opzichte van het scenario Europese Integratie) niet zo'n grote impact heeft dat een extra elektrische aansluiting mogelijk is. Daarbij moet wel benoemd worden dat ook het scenario Europese Integratie, met relatief weinig elektrolyse en elektrificatie, uitgaat van een toename van elektrolyse en overige elektriciteitsvraag ten opzichte van de huidige plannen. Als er nog minder elektrolyse en/of elektrificatie dan in dit scenario komt, dan kan dat wel betekenen dat minder elektrische aansluitingen ingepast kunnen worden.
- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aansluitingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aansluiting, hoe meer elektrolyse gewenst is en vice versa. Er wordt in de doorrekening uitgegaan van maximaal 400 tot 700 MW elektrolyse, bij twee elektrische aansluitingen in de regio. Deze inschatting is gemaakt met de modellering van ii3050. In deze modellering is een inschatting gemaakt van een efficiënte hoeveelheid aan elektrolyzers, in Nederland en per regio, op basis van de lokale balans van vraag en aanbod.
- Dezelfde waterstofleidingen worden gebruikt voor het transport van waterstofaanbod van grootschalige elektrolyse op land en waterstofaansluitingen richting het Waterstofnetwerk Nederland en via het Waterstofnetwerk Nederland richting de rest van Nederland. In Noord-Holland Zuid heeft het voorziene Waterstofnetwerk Nederland voldoende capaciteit om beide ontwikkelingen te faciliteren.

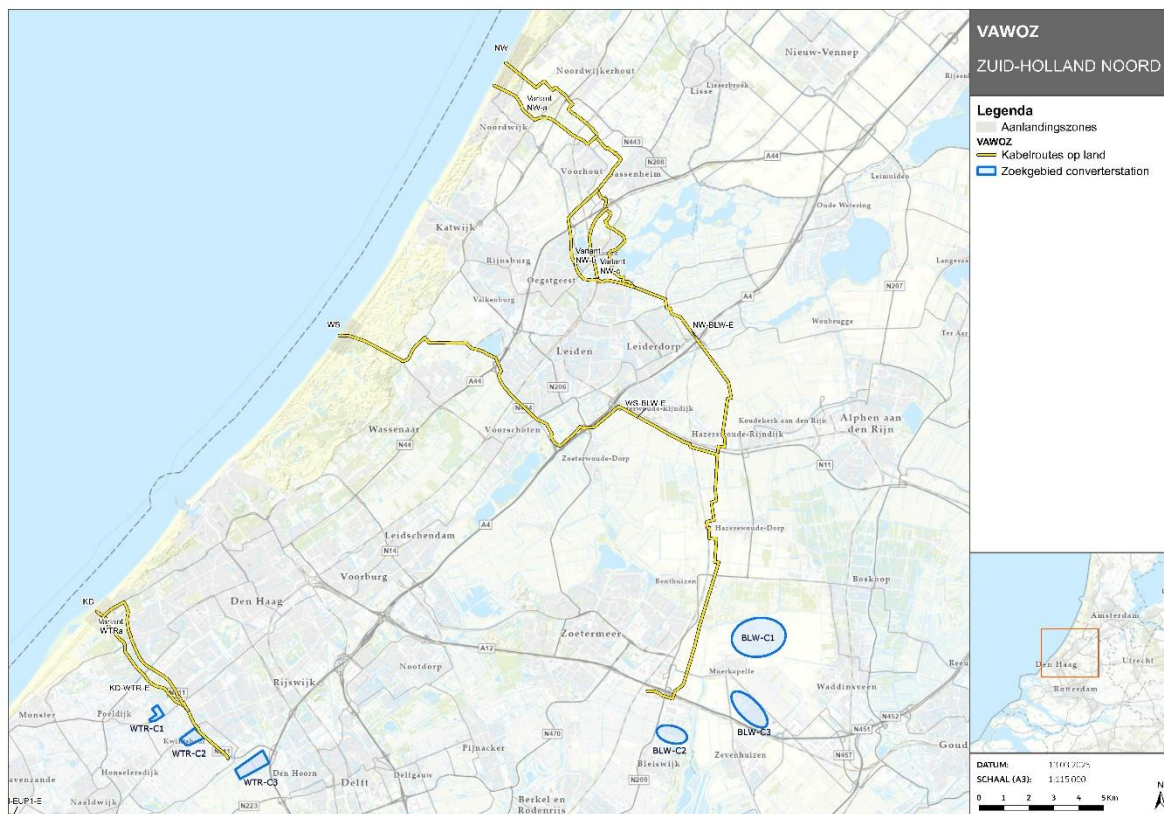
## 9 Beoordeling Zuid-Holland

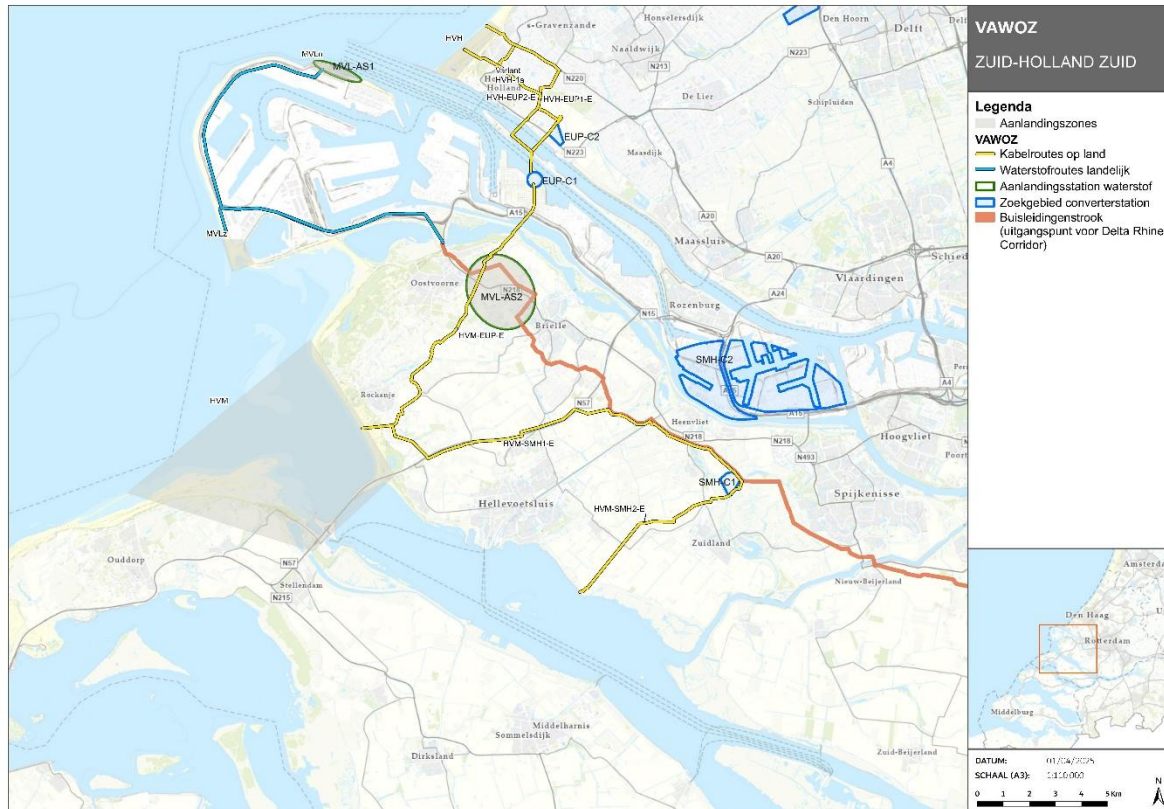
### 9.1 Omschrijving regio

#### 9.1.1 Potentiële routes en aansluitlocaties

In Figuur 9-1 staan de potentiële oplossingsrichtingen voor elektrische en waterstofroutes voor de regio Zuid-Holland. De elektrische routes lopen naar de bestaande 380kV-stations Bleiswijk en Wateringen, een nieuw te bouwen 380kV-station Europoort en het bestaande 380kV-station Simonshaven.

De waterstofroutes lopen naar het Waterstofnetwerk Rotterdam, waar het aansluit op Waterstofnetwerk Nederland, en de Delta Rhine Corridor. Voor een aanlandingsstation voor waterstof zijn drie zoekgebieden in beeld: een zoekgebied nabij de aanlandingszone Maasvlakte Noord, een zoekgebied rondom de Delta Rhine Corridor (DRC) tussen Goudhoek en Brielle en een zoekgebied rondom de kruising van de N57 en de DRC.





Figuur 9-1 Elektrische en waterstofroutes in Zuid-Holland

### 9.1.2 Relevante aspecten voor systeemintegratie

Vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW staat 7,5 GW elektrische aanlanding gepland in deze regio, allemaal op de Maasvlakte (bij stations Maasvlakte en Amaliahaven). Vanwege beperkte aansluitcapaciteit en beperkte beschikbare ruimte, wordt in pVAWOZ ook naar de andere 380 kV-stations in de buurt gekeken. Vanaf de Maasvlakte lopen twee 380 kV-circuits richting Wateringen en Bleiswijk en twee circuits via Simonshaven en Crayestein naar Krimpen. In totaal zijn er dus vier 380 kV-circuits die stroom afvoeren vanuit de regio. De stations Europoort, Bleiswijk en Wateringen liggen op de verbinding tussen de Maasvlakte en Bleiswijk, het station Simonshaven op de verbinding naar Krimpen.

Daarnaast wordt in de analyses uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker.

De onderstaande tabel geeft de kerncijfers voor vraag, aanbod en flexibiliteit in de regio Zuid-Holland. De elektriciteitsvraag in de regio zal in 2040 naar verwachting 45 tot 51 TWh per jaar zijn. Hiervan komt een groot deel van de industrie van de Rotterdamse Haven, maar ook een groot deel door de gebouwde omgeving. De elektriciteitsvraag is gemiddeld 5,1-5,8 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische aanlandingen zal doorgevoerd worden richting de rest van Nederland. De vraag is hoeveel elektrische aanlanding

mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

Tabel 9-1 Kerncijfers vraag, aanbod en flexibiliteit Zuid-Holland<sup>47</sup>

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
<b>Vraag en aanbod</b>		
<i>Elektriciteitsvraag</i>	51 TWh/5,8 GW	45 TWh/5,1 GW
<i>Wind op land</i>	2.200 MW	1.300 MW
<i>Zon-pv</i>	5.800 MW	4.700 MW
<i>Kernenergie</i>	350 MW	1.750 MW
<b>Flexibiliteit (afhankelijk van hoeveelheid elektrische aanlanding)</b>		
<i>Elektrolyzers</i>	3.000 tot 5.500 MW	1.850 tot 3.200 MW

De belangrijkste factoren die impact hebben op het aantal elektrische aanlandingen dat in Zuid-Holland mogelijk is zijn:

- **Ontwikkeling elektrolyzers.** Deze zetten lokaal overschotten van elektriciteit om in waterstof, zodat deze niet doorgevoerd hoeven te worden richting de rest van Nederland. In beide scenario's is uitgegaan van een aanzienlijk vermogen aan elektrolyzers. Als deze niet gerealiseerd worden, dan zullen minder elektrische aanlandingen mogelijk zijn. De ontwikkeling van elektrolyse verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse is in meer detail naar de wisselwerking tussen elektrolyse en wind op zee gekeken (paragraaf 5.2).
- **Ontwikkeling van de elektriciteitsvraag van Rotterdamse Haven.** Bij minder elektriciteitsvraag, bijvoorbeeld door krimp/vertrek van lokale industrie, is minder elektrische aanlanding mogelijk. Bij meer elektriciteitsvraag is meer elektrische aanlanding mogelijk. De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse hebben we specifiek gekeken naar de plannen van de CES (paragraaf 5.3).
- **Eventuele ontwikkeling kernenergie.** De lokale overschotten veroorzaakt door gelijktijdige productie van kerncentrales als windparken op zee moeten via dezelfde 380kV-verbindingen vanaf Rotterdam richting de rest van Nederland getransporteerd worden. Hier hebben we in een gevoeligheidsanalyse naar gekeken (zie paragraaf 5.4)
- **Ontwikkeling netuitbreiding Randstad.** In de analyses wordt uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker. We hebben de situatie zonder deze netuitbreiding in de Randstad onderzocht in een gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 5.5).

Bij de potentiële waterstofaanlanding in Zuid-Holland zal waterstof via Waterstofnetwerk Rotterdam getransporteerd worden naar het landelijke waterstofnetwerk. Voor de waterstofaanlanding zijn de volgende zaken van belang:

- **Capaciteit elektrolyse op land.** De geproduceerde waterstof van elektrolyse op land zal namelijk via dezelfde buisleidingen getransporteerd worden.
- **Ontwikkeling waterstofvraag Rotterdamse Haven.** Hierdoor kan een deel van de waterstof die aan land gebracht wordt direct lokaal benut worden.

<sup>47</sup> De geografische afbakening bij deze cijfers is de provincie Zuid-Holland.

- **Import waterstof.** Geïmporteerde waterstof in Rotterdam wordt mogelijk ook (deels) via het landelijke waterstofnetwerk getransporteerd en zal dan via dezelfde buisleidingen getransporteerd worden.

## 9.2 Beoordeling elektrische aanlandingen

### 9.2.1 Benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Er zijn verschillende mogelijke elektrische routes richting de vier aansluitlocaties in de regio Zuid-Holland. Deze routes komen allemaal vanuit windpark 6/7. Vergeleken met de andere potentiële aansluitlocaties hebben de alternatieven richting Zuid-Holland een **gemiddelde lengte**.

Tabel 9-2 Beoordeling benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen Zuid-Holland

Effect	Station Bleiswijk	Station Wateringen	Station Simonshaven	Station Europoort
Korte lengte				
Gemiddelde lengte	X	X	X	X
Grote lengte				

### 9.2.2 Aansluitcapaciteit

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang.

Hierbij maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in de regio Zuid-Holland vier potentiële aansluitlocaties. Dit zijn de bestaande 380kV-stations Bleiswijk, Wateringen en Simonshaven en het geplande 380kV-station Europoort.

Bij elk van de bestaande 380kV-stations Bleiswijk, Wateringen en Simonshaven kan naar verwachting tot één elektrische aanlanding aangesloten worden. Bij meer dan één elektrische aanlanding is een nieuw station nodig. Bij het geplande 380kV-station Europoort kunnen twee aanlandingen aangesloten worden, zonder ingrepen binnen het station. Bij meer dan twee aanlandingen is een nieuw 380kV-station nodig, wat een grote ingreep is.

De onderstaande capaciteit geeft het overzicht van de beoordeling van de aansluitcapaciteit van stations voor elektrische aanlanding in Zuid-Holland.

Tabel 9-3 Beoordeling aansluitcapaciteit stations Zuid-Holland

Effect	Station Bleiswijk	Station Wateringen	Station Simonshaven	Station Europoort
Geen ingreep	Tot één aanlanding	Tot één aanlanding	Tot één aanlanding	Tot twee aanlandingen

Beperkte ingreep of onzeker				
Grote ingreep	Meer dan één aanlanding	Meer dan één aanlanding	Meer dan één aanlanding	Meer dan twee aanlandingen

### 9.2.3 Impact op afvoerende 380kV-verbindingen

De elektriciteit van de windparken op zee wordt deels in de regio gebruikt, maar wordt grotendeels doorgevoerd via hoogspanningsverbindingen. Bij dit effect beoordelen we de impact van de aanlanding van wind op zee op deze verbindingen en de ingrepen die nodig zijn om de windenergie af te voeren. Hierbij maken we onderscheid tussen drie soorten ingrepen (meer toelichting in paragraaf 3.4.4):

- Geen ingreep noodzakelijk.
- Een operationele ingreep, met redispatch. Dit is een beperkte ingreep.
- Een grote ingreep. Zoals netverzwaring, systeemoplossing of een marketingreep (zie paragraaf 3.4.4).

Vanaf de Maasvlakte lopen twee 380 kV-circuits richting Wateringen en Bleiswijk en twee circuits via Simonshaven en Crayestein naar Krimpen. In totaal zijn er dus vier 380 kV-circuits die stroom afvoeren vanuit de regio. De stations Europoort, Bleiswijk en Wateringen liggen op de verbinding tussen de Maasvlakte en Bleiswijk, het station Simonshaven op de verbinding naar Krimpen. Daarnaast wordt in de analyses de aanleg van een nieuwe 380kV-verbinding vanaf Maasvlakte Amaliahaven naar Diemen en vervolgens Beverwijk meegenomen. Hier wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en is daarom nog onzeker (meer hierover in paragraaf 5.5).

De elektriciteitsvraag is gemiddeld 5,1-5,8 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische aanlandingen zal doorgevoerd worden richting de rest van Nederland. De vraag is hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

In de doorrekeningen zijn configuraties met nul tot drie aanlandingen van 2 GW in Zuid-Holland, bovenop de routekaart windenergie op zee 21 GW, doorgerekend voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, zie paragraaf 1.3.1). Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor de eventuele ontwikkeling van twee grote kerncentrales, de Randstad uitbreiding, de energievraag van de industrie en de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibiliteit.

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- In alle gevallen zijn beperkte ingrepen nodig op 380kV-verbindingen in Zuid-Holland.
- Bij het scenario Nationaal Leiderschap zijn twee of drie aanlandingen mogelijk zonder grote ingrepen, bij het scenario Europese Integratie gaat het om één of twee aanlandingen<sup>48</sup>. Het

<sup>48</sup> Uit de doorrekeningen volgt dat in alle scenario's en configuraties ingrepen nodig zijn op de 380kV-verbinding tussen Maasvlakte en Amaliahaven. De omvang van de ingreep lijkt niet gecorreleerd aan de

scenario Nationaal Leiderschap gaat, ten opzichte van het scenario Europese Integratie, uit van meer elektriciteitsvraag en meer vermogen aan flexibele bronnen. De hogere (flexibele) elektriciteitsvraag in het scenario Nationaal Leiderschap leidt ertoe dat meer elektrische aanlanding mogelijk is.

- Bij realisatie van twee grote kerncentrales in Zuid-Holland is nul of één elektrische aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in beide energetische scenario's.
- Een belangrijke onzekerheid voor aanlanding in Zuid-Holland is de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5). Als deze complexe netuitbreiding niet (tijdig) gerealiseerd wordt, dan is aanlanding in de Randstad uitdagend en lijkt maximaal één elektrische aanlanding mogelijk in Zuid-Holland óf Noord-Holland Zuid zonder grote ingreep. Dit is bovenop de ene aanlanding die mogelijk lijkt in de Kop van Noord-Holland (zie paragraaf 6.2.3). De Netuitbreiding Randstad wordt ook besproken in de beoordeling *Toekomstvastheid en Tijd*.

Tabel 9-4 Beoordeling impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen Zuid-Holland

Effect	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Twee grote kerncentrales	Geen netuitbreiding Randstad
Geen ingreep				
Beperkte ingreep	Twee of drie aanlandingen	Eén of twee aanlandingen	Nul of één aanlanding	Eén aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland
Grote ingreep	Bij meer dan twee of drie aanlandingen	Bij meer dan één of twee aanlanding	Meer dan nul of één aanlanding	Meer dan één aanlanding

## 9.2.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor elektrische aanlanding in de regio Zuid-Holland op de algehele elektriciteitsinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 9-5 Beoordeling elektrische aanlandingen Zuid-Holland

Beoordeeld effect	Station Bleiswijk	Station Wateringen	Station Simonshaven	Station Europoort
<b>Energie-infrastructuur tot aansluitlocatie</b>	Gemiddelde lengte	Gemiddelde lengte	Gemiddelde lengte	Gemiddelde lengte
<b>Aansluitcapaciteit</b>	Geen ingreep bij één aanlanding. Grote ingreep bij meer dan één aanlanding.	Geen ingreep bij één aanlanding. Grote ingreep bij meer dan één aanlanding.	Geen ingreep bij één aanlanding. Grote ingreep bij meer dan één aanlanding.	Geen ingreep bij één of twee aanlandingen. Grote ingreep bij meer dan twee aanlandingen.
<b>Impact op afvoerende HS-verbindingen</b>	Scenario Nationaal Leiderschap: twee of drie aanlandingen zonder grote ingreep Scenario Europese Integratie: één of twee aanlandingen zonder grote ingreep Bij twee grote kerncentrales: nul tot één aanlanding zonder grote ingreep. Onzekerheid door de voorziene Netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5), zonder deze uitbreiding is aanlanding in Randstad uitdagend en lijkt één aanlanding mogelijk in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland mogelijk zonder grote ingreep.			

De lengte van het kabeltracé vanaf het windpark op zee tot aan de potentiële aansluitlocaties in Zuid-Holland is gemiddeld, wat betekent dat er een gemiddelde hoeveelheid nieuwe **energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie** nodig is.

aanlanding van wind op zee en deze uitkomsten lijken door specifieke (en onlogische) aannames in de modellering te komen. We verwachten dat deze in de praktijk niet op zullen treden. Daarom wegen we dit niet mee bij de beoordeling.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat bij het nieuwe station Europoort twee nieuwe elektrische aanlandingen aangesloten kunnen worden, zonder ingrepen. Bij de bestaande stations Bleiswijk, Wateringen en Simonshaven kan één aanlanding aangesloten worden.

**Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructureur, geen absolute waarheid**

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructureur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

Er kunnen, bij de ontwikkelingen van de doorgerekende scenario's, één tot drie elektrische aanlandingen in Zuid-Holland gerealiseerd worden zonder grote ingrepen bij de **HS-verbindingen**. De hogere (flexibele) elektriciteitsvraag in het scenario Nationaal Leiderschap leidt ertoe dat meer elektrische aanlanding mogelijk is.

Grote afhankelijkheden bij de inpassing van elektrische aanlandingen in Zuid-Holland zijn de eventuele ontwikkeling van kernenergie (paragraaf 5.4) en de netuitbreiding van de Randstad (paragraaf 5.5). Bij realisatie van twee grote kerncentrales in Zuid-Holland is nul of één elektrische aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in beide energetische scenario's. Als de netuitbreiding in de Randstad niet (tijdig) gerealiseerd wordt, dan lijkt maximaal één elektrische aanlanding mogelijk in Zuid-Holland óf Noord-Holland Zuid zonder grote ingreep.

### **Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?**

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marketingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marketingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## **9.3 Beoordeling waterstofverbindingen**

### **9.3.1 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op zee**

Het waterstofnetwerk op zee, dat loopt vanaf elektrolyzers op zee naar de aanlandlocatie op de Maasvlakte, heeft vergeleken met de andere potentiële aanlandlocaties een **grote lengte**.

### **9.3.2 Benodigde nieuwe waterstofinfrastructuur op land tot aan nationaal netwerk**

Voor het waterstoftransport van aanlandlocatie naar het Waterstofnetwerk Nederland (WNL) is een nieuwe buisleiding van enkele tientallen kilometers nodig. De complexiteit voor het realiseren van deze buisleiding is relatief groot doordat het een druk gebied is met veel ontwikkelingen, waardoor er weinig ruimte is in de ondergrond. Omdat de complexiteit van deze route groot is hebben we deze beoordeeld als een **ingreep met grote risico's**.

### **9.3.3 Benodigde uitbreidingen van het Waterstofnetwerk Nederland**

Uit de netwerkanalyse van Gasunie volgt dat er additionele verzwaring en/of compressie nodig is bij het Waterstofnetwerk Nederland als gevolg van de waterstofaanlanding op de Maasvlakte, bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn (zie paragraaf 3.5.1). Dit betekent dat er bij waterstofaanlanding in Zuid-Holland **grote ingrepen** aan het WNL nodig zijn.

### **9.3.4 Conclusies**

De beoordeling van de impact van de keuze voor aanlanding van waterstof in de regio Zuid-Holland (met aanlandlocatie Maasvlakte) op de algehele waterstofinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 9-6 Beoordeling impact waterstofaanlanding in Zuid-Holland op waterstofinfrastructuur

Effect	Infrastructuur op zee	Infrastructuur op land tot landelijk netwerk	Waterstofnetwerk Nederland
Geen ingreep/korte lengte en weinig risico's			
Beperkte/gemiddelde ingreep of gemiddelde risico's			
Grote ingreep of grote risico's	X	X	X

## 9.4 Beoordeling elektrolyse

### 9.4.1 Aansluitcapaciteit

Grootschalige elektrolyzers moeten worden aangesloten op hoogspanningsstations. Hier moet voldoende aansluitcapaciteit voor beschikbaar zijn. Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in de regio Zuid-Holland vier potentiële aansluitlocaties, de bestaande stations Simonshaven, Bleiswijk en Wateringen en het geplande station Europoort. Dit zijn allen 380kV-stations.

Bij het geplande station Europoort kan naar verwachting grootschalige elektrolyse aangesloten worden zonder ingrepen, omdat er op de nieuwe stations veel vrije velden beschikbaar zijn. Deze velden kunnen in de toekomst echter ook voor andere klantaanvragen of netuitbreidingen gebruikt worden, dus dit beeld kan nog veranderen.

Bij de bestaande stations Simonshaven, Bleiswijk en Wateringen zijn weinig vrije velden beschikbaar om nieuwe afnemers aan te sluiten en is de kans aanwezig dat deze velden voor andere klantaanvragen of voor netuitbreidingen nodig zijn. Dat betekent dat het momenteel onzeker is of het aansluiten van grootschalige elektrolyse (groter dan 500 MW) mogelijk is. Dit geldt ook bij uitbreiding van deze bestaande stations. Gedetailleerder onderzoek op stationsniveau is noodzakelijk om te bepalen wat mogelijk is bij de stations. Indien een aansluiting op het 380kV-station niet mogelijk is, dan kan het een optie zijn om een kleiner vermogen aan elektrolyse (kleiner dan 500 MW) aan te sluiten op een onderliggend 150kV-station, maar ook dit dient per station onderzocht te worden.

Tabel 9-7 Beoordeling aansluitcapaciteit elektrolyzers stations Zuid-Holland

Effect	Station Bleiswijk	Station Wateringen	Station Simonshaven	Station Europoort
Geen ingreep				X
Beperkte ingreep of onzeker				
Grote ingreep	X	X	X	

## 9.4.2 Impact op hoogspanningsverbindingen

Bij dit effect beoordelen we de impact van grootschalige elektrolyse op de belasting van de hoogspanningsverbindingen. Elektrolyzers hebben een, in veel gevallen positieve, impact op de hoogspanningsverbindingen doordat ze leiden tot extra elektriciteitsvraag bij de aansluitlocaties, waardoor minder elektriciteit afgevoerd dient te worden via de hoogspanningsverbindingen en deze minder belast worden. Dit beoordelen we voor de hele regio.

Grootschalige elektrolyse heeft in de Zuid-Holland (bij realisatie van extra elektrische aanlanding) een positief effect op de belasting van de hoogspanningsverbindingen, aangezien met name knelpunten op de 380kV-verbindingen plaatsvinden door afvoer van overschotten van windstroom en dat deze minder worden door inzet van grootschalige elektrolyse.

Elektrolyzers kunnen ook nieuwe knelpunten op hoogspanningsverbindingen veroorzaken, als ze ingezet worden op momenten met weinig productie van windparken op zee (maar bijvoorbeeld wel veel zon). Dan leidt inzet van elektrolyzers tot extra transport richting de aansluitlocaties. Dit kan in de regio Zuid-Holland tot nieuwe knelpunten leiden. Het netto effect van de inzet van elektrolyzers is naar verwachting echter wel positief.

Aangezien het netto effect van de inzet van elektrolyzers is naar verwachting positief is, en elektrolyse kan bijdragen aan de inpassing van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet, is de beoordeling **positief**.

Tabel 9-8 Beoordeling impact elektrolyzers op HS-verbindingen Zuid-Holland

Score	Effect	Impact op HS-verbindingen
++	Zeer positief	
+	Positief	X
0	Neutraal	

## 9.4.3 Impact op waterstofinfrastructuur

De waterstof die geproduceerd met de elektrolyzers zal afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk (en deels lokaal benut worden). Bij het uitrolplan van het Waterstofnetwerk Nederland wordt rekening gehouden met plannen voor elektrolyse op land, en daarnaast met andere ontwikkelingen rondom waterstof (zoals waterstofimport en productie blauwe waterstof). De bovengrens van het vermogen aan elektrolyse in Rotterdam in de doorgerekende scenario's (zie paragraaf 9.4.5) ligt hoger dan het vermogen waar rekening mee gehouden wordt in het uitrolplan. Het is **onzeker** of de bovengrens aan elektrolyse uit de doorgerekende scenario's ingepast kan worden in het waterstofnetwerk zonder ingrepen (bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn, zie paragraaf 3.5.1).

Daarbij moet wel benoemd worden dat de voorziene ontwikkeling van elektrolyse op land slechts een beperkt deel is van de hoeveelheid waterstof die afgevoerd moet worden. Voor andere bronnen, zoals blauwe waterstof en import, wordt rekening gehouden met grotere volumes. Als de ontwikkelingen van die andere bronnen minder hard gaan dan waar nu rekening mee gehouden is, dan is er meer capaciteit beschikbaar voor afvoer van waterstof van elektrolyzers op land.

Tabel 9-9 Beoordeling impact elektrolyzers waterstofinfrastructuur Zuid-Holland

Effect	Impact op waterstofinfrastructuur
Geen ingreep	
Beperkte ingreep of onzeker	X
Grote ingreep	

#### 9.4.4 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving en glastuinbouw. In de omgeving van de potentiële aansluitlocaties in Zuid-Holland wonen veel mensen en is de warmtevraag van de gebouwde omgeving dus groot. Ook zijn er veel buurten in de omgeving waarvoor een warmtenet de laagste nationale kosten heeft volgens de [startanalyse 2020](#). Dit betekent dat er naar verwachting potentieel is voor benutting van de restwarmte in de regio. Daarom is de beoordeling **positief**.

Met name volgende aansluitlocaties zijn interessant voor de benutting van restwarmte:

1. Wateringen: Zowel de gebouwde omgeving in Den Haag als glastuinbouwgebied Westland zijn nabijgelegen. Een extra voordeel van warmtelevering in het glastuinbouwgebied Westland is de lagere leveringstemperatuur.
2. Bleiswijk: Zowel de gebouwde omgeving in Zoetermeer als glastuinbouwgebied Oostland zijn nabijgelegen. Een extra voordeel van warmtelevering in het glastuinbouwgebied Westland is de lagere leveringstemperatuur.
3. Europoort: Interessant voor landbouwgebied Westland aan de andere kant van de Maas. Er is naar verwachting relatief veel nabijgelegen restwarmte beschikbaar.

Tabel 9-10 Beoordeling mogelijkheid benutting restwarmte Zuid-Holland

Score	Effect	Mogelijkheid benutting restwarmte
+	Positief	X
0	Neutraal	
-	Negatief	

#### 9.4.5 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse pVAWOZ

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>49</sup>.

<sup>49</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vergelijking van de huidige plannen met de aannames in de scenario's. In Zuid-Holland is de bovengrens van de huidige plannen al gelijk aan de aangenomen hoeveelheden bij het scenario Europese Integratie met weinig extra aanlanding van wind op zee. Dit zijn echter nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is. Bij meer aanlanding van wind op zee en bij het scenario Nationaal Leiderschap is de aangenomen hoeveelheid elektrolyse nog wel meer dan (de bovengrens van) de huidige plannen.

*Tabel 9-11 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's*

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Zuid-Holland	200 – 2.100 MW	3.000 – 5.500 MW	1.900 – 3.200 MW

#### **Inschatting bestaande plannen elektrolyzers**

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

---

waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

## 9.4.6 Conclusies

De beoordeling van grootschalige elektrolyse in Zuid-Holland is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 9-12 Beoordeling elektrolyzers Zuid-Holland

Beoordeeld effect	Station Bleiswijk	Station Wateringen	Station Simonshaven	Station Europoort
Aansluitcapaciteit	Grote ingreep	Grote ingreep	Grote ingreep	Geen ingreep
Impact op HS-verbindingen	Positief			
Impact op waterstofinfrastructuur	In ieder geval fors vermogen zonder ingrepen. Onzeker of bovengrens scenario's inpasbaar is.			
Mogelijkheid benutting restwarmte	Positief			
Bestaande plannen en noodzaak meer elektrolyse	Mogelijk extra elektrolyse bovenop bestaande plannen wenselijk. Daarnaast bestaande plannen nog onzeker.			

Grootschalige elektrolyse kan naar verwachting aangesloten worden op het geplande station bij Europoort. Bij de bestaande stations Bleiswijk, Wateringen en Simonshaven is dit onzeker, maar is verder onderzoek op stationsniveau nodig om uitsluitsel te geven. Bij het uitrolplan van het Waterstofnetwerk Nederland wordt rekening gehouden met plannen voor elektrolyse op land. Dus er zal in ieder geval grootschalige elektrolyse ingepast kunnen worden. Maar het is **onzeker** of de bovengrens aan elektrolyse uit de doorgerekende scenario's ingepast kan worden in het waterstofnetwerk zonder ingrepen. Dit betekent dat het naar verwachting **mogelijk** is om in ieder geval een significante hoeveelheid grootschalige elektrolyse te realiseren in de regio zonder forse uitbreidingen van de energie-infrastructuur (bovenop geplande uitbreidingen), indien het gerealiseerd wordt bij Europoort.

Grootschalige elektrolyse in de regio heeft naar verwachting een positieve impact op de belasting van hoogspanningsverbindingen en kan daarmee bijdragen aan de integratie van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet, maar kan ook nieuwe knelpunten op het hoogspanningsnet veroorzaken. Het netto-effect is echter positief. Daarmee is grootschalige elektrolyse in de regio ook **gunstig**, bij elektrische aanlanding van wind op zee. De restwarmte, die geproduceerd wordt door elektrolyzers, kan naar verwachting benut worden in de regio.

In Zuid-Holland is de bovengrens van de huidige plannen al gelijk aan de aangenomen hoeveelheden bij het scenario Europese Integratie met weinig extra aanlanding van wind op zee. Dit zijn echter nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is. Bij meer aanlanding van wind op zee en bij het scenario Nationaal Leiderschap is de aangenomen hoeveelheid elektrolyse nog wel meer dan (de bovengrens van) de huidige plannen.

## 9.5 Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers

De elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aansluitingen en verminderen de belasting op de HS-verbindingen. We zien bij de twee doorgerekende scenario's dat meer grootschalige elektrolyse en (overige elektriciteitsvraag) ertoe bijdraagt dat extra elektrische aansluiting ingepast kan worden zonder grote ingreep in Zuid-Holland. Ook het scenario Europese Integratie, met relatief weinig elektrolyse en elektrificatie, gaat al uit van een toename van elektrolyse en overige elektriciteitsvraag ten opzichte van de huidige plannen. Als er nog minder elektrolyse en/of elektrificatie dan in dit scenario komt, dan kan dat betekenen dat nog minder elektrische aansluitingen ingepast kunnen worden.
- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aansluitingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aansluiting, hoe meer elektrolyse gewenst is en vice versa. Er wordt in de doorrekening uitgegaan van 3.200 tot 5.500 MW elektrolyse, bij drie elektrische aansluitingen in de regio. Deze inschatting is gemaakt met de modellering van ii3050. In deze modellering is een inschatting gemaakt van een efficiënte hoeveelheid aan elektrolyzers, in Nederland en per regio, op basis van de lokale balans van vraag en aanbod.
- Dezelfde waterstofleidingen worden gebruikt voor het transport van waterstofaanbod van grootschalige elektrolyse op land en waterstofaansluitingen richting het Waterstofnetwerk Nederland en via het Waterstofnetwerk Nederland richting de rest van Nederland. In Zuid-Holland heeft het voorziene Waterstofnetwerk Nederland onvoldoende capaciteit voor waterstofaansluiting. Het voorziene Waterstofnetwerk Nederland heeft wel capaciteit voor elektrolyse op land. Het is echter wel onzeker of de bovengrens aan elektrolyse uit de doorgerekende scenario's ingepast kan worden in het waterstofnetwerk zonder ingrepen.

## 10 Beoordeling Noord-Brabant en Limburg

### **Diepe aanlandingen niet langer in pVAWOZ, inzichten systeemintegratie wel opgenomen in dit rapport**

In pVAWOZ is ook onderzoek gedaan naar diepe aanlandingen. Uitgangspunt voor pVAWOZ voor de zogenaamde 'diepe aanlandingen van wind op zee' naar Tilburg, Maasbracht en Graetheide was de situering van de benodigde kabels in de buisleidingenstrook van de Delta Rhine Corridor (DRC). De minister heeft in december 2024 echter besloten om gelijkstroomkabels uit de DRC te halen om snelheid te kunnen maken met de ontwikkeling van het waterstofnetwerk en een CO2 verbinding. Met het ontbreken van een tracé voor deze kabels zijn de onderzoeken naar diepe aanlandingen voor pVAWOZ komen te vervallen.

Daarom is door het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) een nieuw onderzoekstraject gestart voor aanlandingen van wind op zee diep landinwaarts. De inzichten over diepe aanlanding vanuit Systeemintegratie zijn echter nog wel opgenomen in dit rapport. In deze verkenning diepe aanlandingen worden ook de inzichten uit dit rapport meegenomen.

### 10.1 Omschrijving regio

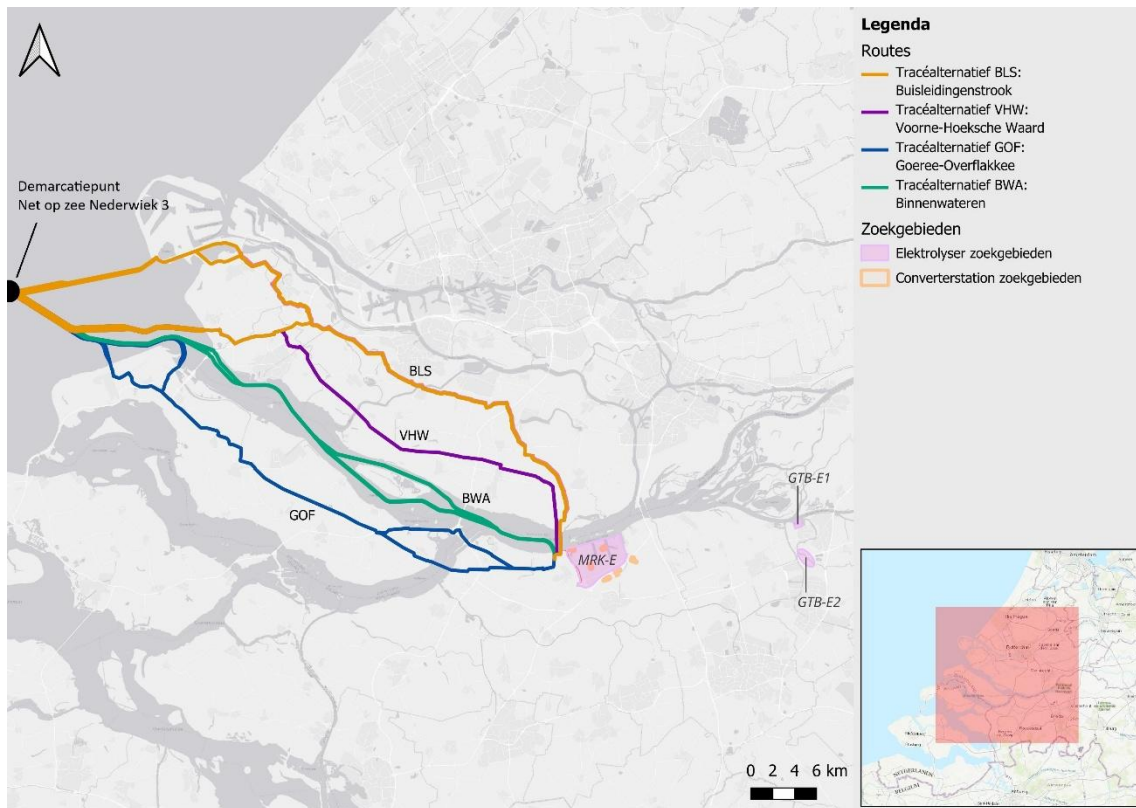
#### 10.1.1 Potentiële routes en aansluitlocaties

Potentiële aansluitmogelijkheden op de 380kV-stations in Moerdijk of Geertruidenberg werden onderzocht in het kader van het MER Fase 1 dat is gestart voor het project Net op Zee project Nederwiek 3. In januari 2025 heeft de minister het voorkeursalternatief (VKA) voor Nederwiek 3 vastgesteld, waarbij gekozen is voor aansluiting op 380 kV-station Geertruidenberg via de Binnenwaterenroute<sup>50</sup>. Het onderzoek richt zich nu op de vraag of er nog 1 of 2 verbindingen mogelijk zijn naar Moerdijk in het kader van het Programma VAWOZ.

Er wordt daarnaast gekeken naar de mogelijkheid om maximaal drie elektrische verbindingen diep landinwaarts aan te landen. Dit zijn de verbindingen die aansluiten in Tilburg en/of Maasbracht en Graetheide. Deze diepe aanlandingen worden niet meer onderzocht in het pVAWOZ na de keuze om deze aanlandingen niet meer mee te nemen in de projectprocedure van de DRC. Binnen de IEA van pVAWOZ nemen we diepe aanlanding nog wel mee bij de analyses voor systeemintegratie, aangezien het hierbij gaat om de totale impact van alle regio's op het energiesysteem (zie bovenstaand kader).

Voor het aanlanden van waterstofverbindingen in het Programma VAWOZ wordt niet gekeken naar een aanlanding in Noord-Brabant of Limburg. Aansluiting van waterstofverbindingen vanaf zee op de Delta Rhine Corridor vindt plaats in Zuid-Holland. Er is daarom geen beoordeling van de impact op waterstofinfrastructuur nodig voor de regio Noord-Brabant en Limburg.

<sup>50</sup> Zie [projectpagina Nederwiek 3](#).



Figuur 10-1 Elektrische routes Moerdijk

### 10.1.2 Relevante aspecten voor systeemintegratie

In de routekaart windenergie op zee 21 GW staat 2 GW elektrische aanlanding gepland in deze regio, een aanlanding van Nederwiek 3 bij Geertruidenberg. Moerdijk en Geertruidenberg liggen vermaasd in het nationale 380kV-netwerk, en niet op een uitloper zoals de andere aanlandregio's. Vanaf Geertruidenberg lopen 380kV-verbindingen richting Krimpen in Zuid-Holland, richting Eindhoven en richting Rilland in Zeeland. Begin jaren '30 wordt station Moerdijk gerealiseerd op de 380kV-verbinding tussen Geertruidenberg en Rilland.

De onderstaande tabel geeft de kerncijfers voor vraag, aanbod en flexibiliteit in de regio Moerdijk-Geertruidenberg. De elektriciteitsvraag in de regio zal in 2040 naar verwachting 11 tot 16 TWh per jaar zijn. Hiervan komt het grootste deel van de chemische industrie bij Moerdijk. De elektriciteitsvraag is gemiddeld 1,2-1,8 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische aanlandingen zal doorgevoerd worden richting de rest van Nederland.

Tabel 10-1 Kerncijfers vraag, aanbod en flexibiliteit Moerdijk/Geertruidenberg<sup>51</sup>

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
<b>Vraag en aanbod</b>		
Elektriciteitsvraag	16 TWh/1,8 GW	11 TWh/1,2 GW
Wind op land	700 MW	400 MW
Zon-pv	2.500 MW	2.000 MW

<sup>51</sup> De geografische afbakening bij deze cijfers is de regio West-Brabant.

Flexibiliteit (afhankelijk van hoeveelheid elektrische aanlanding)		
Elektrolyzers	700 – 1.900 MW	400 – 1.100 MW

Er is naar verwachting veel transport van elektriciteit nodig richting Limburg door de elektriciteitsvraag van Chemelot en export van elektriciteit richting België en Duitsland op momenten met veel productie van wind op zee. Door diepe aanlanding in Limburg en Noord-Brabant kan de additionele belasting door invoeding van wind op zee op de bovengrondse 380 kV-verbindingen vanaf de kust, via Noord-Brabant, naar Limburg verminderd worden. Echter, bij te veel elektrische aanlanding in Limburg kunnen mogelijk nieuwe knelpunten ontstaan.

De transportstromen vanaf de kust richting Limburg zijn afhankelijk van lokale vraag in Limburg en de export van elektriciteit naar Duitsland en België. De export richting Duitsland en België is afhankelijk van de nationale balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit, en de ontwikkelingen in het buitenland. In het scenario Europese Integratie is er in Nederland relatief weinig elektriciteitsvraag is en meer aanbod van elektriciteit door inzet van kerncentrales. Daarom vindt in dit scenario meer export van elektriciteit plaats.

## 10.2 Beoordeling elektrische aanlandingen

### 10.2.1 Benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Er zijn verschillende mogelijke elektrische routes richting de vijf aansluitlocaties in Noord-Brabant en Limburg. Deze routes komen allemaal vanuit windpark 6/7 en lopen via routes van Nederwiek 3 (Moerdijk) of volgens een nog nader te bepalen route (Tilburg, Maasbracht, Graetheide). Deze routes worden daardoor deels in deze parallelle trajecten onderzocht. Vergeleken met de andere potentiële aansluitlocaties hebben de alternatieven richting Noord-Brabant en Limburg een **grote lengte**.

Tabel 10-2 Beoordeling benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen Noord-Brabant en Limburg

Effect	Station Moerdijk	Station Tilburg	Station Maasbracht	Station Graetheide
Korte lengte				
Gemiddelde lengte				
Grote lengte	X	X	X	X

### 10.2.2 Aansluitcapaciteit

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang.

Hierbij maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in de regio Noord-Brabant en Limburg vier potentiële aansluitlocaties<sup>52</sup>: het bestaande 380kV-stations Maasbracht en de geplande 380kV-stations Moerdijk, Tilburg en Graetheide. De conclusies hiervan zijn:

- Bij het geplande 380kV-station bij Moerdijk kunnen tot twee elektrische aanlandingen gerealiseerd worden, zonder ingrepen binnen het station. Bij meer dan twee aanlandingen is een nieuw 380kV-station nodig.
- Bij het geplande 380kV-station in Tilburg kan tot één elektrische aanlanding aangesloten worden, bij uitbreidingen binnen het station. Bij meer dan één elektrische aanlanding is een nieuw station noodzakelijk.
- Bij het bestaande 380kV-station in Maasbracht kunnen naar verwachting geen aanlandingen aangesloten worden zonder grote ingreep. Mogelijk kan dit wel bij een volledige herstructurering van het station. Anders is een nieuw station noodzakelijk om elektrische aanlanding te realiseren.
- Bij het geplande 380kV-station in Graetheide kunnen tot twee elektrische aanlandingen aangesloten worden zonder grote ingrepen. Bij meer dan twee elektrische aanlandingen is een nieuw station noodzakelijk.

De onderstaande capaciteit geeft het overzicht van de beoordeling van de aansluitcapaciteit van stations voor elektrische aanlanding in Noord-Brabant en Limburg.

Tabel 10-3 Beoordeling aansluitcapaciteit stations Noord-Brabant en Limburg

Effect	Station Moerdijk	Station Tilburg	Station Maasbracht	Station Graetheide
Geen ingreep	Tot twee aanlandingen			Tot twee aanlandingen
Beperkte ingreep of onzeker		Tot één aanlanding		
Grote ingreep	Vanaf twee aanlandingen	Meer dan één aanlanding	Bij één of meer aanlandingen	Meer dan twee aanlandingen

### 10.2.3 Impact op afvoerende 380kV-verbindingen

De elektriciteit van de windparken op zee wordt deels in de regio gebruikt, maar wordt grotendeels doorgevoerd via hoogspanningsverbindingen. Bij dit effect beoordelen we de impact van de aanlanding van wind op zee op deze verbindingen en de ingrepen die nodig zijn om de windenergie af te voeren.

Hierbij maken we onderscheid tussen drie soorten ingrepen (meer toelichting in paragraaf 3.4.4):

- Geen ingreep noodzakelijk.
- Een operationele ingreep, met redispatch. Dit is een beperkte ingreep.
- Een grote ingreep. Zoals netverzwaring, systeemoplossing of een marketingreep (zie paragraaf 3.4.4).

<sup>52</sup> In Nederwiek 3 is aanlanding bij Geertruidenberg als voorkeursalternatief vastgesteld. Daarmee is er op station Geertruidenberg geen aansluiting meer mogelijk vanuit pVAWOZ en wordt dit ook niet meer meegenomen. NB: zoals eerder genoemd worden de aansluitlocaties Tilburg, Maasbracht en Graetheide niet meer onderzocht als onderdeel van het programma VAWOZ.

De regio Noord-Brabant en Limburg is anders dan andere regio's, aangezien elektrische aanlanding in deze gebieden mogelijk ook een positief effect kan hebben op de belasting op 380kV-verbindingen en daarmee ingrepen bij hoogspanningsverbindingen kan voorkomen. In de doorrekeningen van TenneT is de impact op de 380kV-verbindingen bepaald bij verschillende hoeveelheden elektrische aanlanding in Noord-Brabant (bij Moerdijk, Geertruidenberg en/of Tilburg) en Limburg (Maasbracht en/of Graetheide) via de Delta Rhine Corridor. In de doorrekeningen worden configuraties doorgerekend met nul tot twee aanlandingen van 2 GW in Noord-Brabant, tussen de nul en 3 aanlandingen van 2 GW in Limburg. In totaal gaat het om tussen de één en vier aanlandingen van 2 GW in Limburg en Noord-Brabant samen, bovenop de routekaart windenergie op zee 21 GW. Deze configuraties zijn doorgerekend voor beide energetische scenario's.

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Elektrische aanlanding van wind op zee in Noord-Brabant en Limburg heeft een positief effect op de belasting van de 380kV-verbindingen in Noord-Brabant (corridor Krimpen-Geertruidenberg-Tilburg-Eindhoven). Er is een positief effect bij aanlanding dieper landinwaarts dan deze verbindingen. Zo geeft aanlanden in Tilburg dus wel verlichting op het knelpunt Krimpen-Geertruidenberg-Tilburg, maar niet op Tilburg-Eindhoven.
- Het lijkt in ieder geval gunstig voor de belasting op de 380kV-verbindingen in Noord-Brabant en Limburg als er aanlanding in Limburg gerealiseerd wordt. Maar voor een minimale impact op de 380kV-verbindingen lijkt elektrische aanlanding in zowel Noord-Brabant als Limburg gunstiger te zijn dan alleen aanlanding in Limburg.
- Er lijken geen nieuwe ingrepen aan 380kV-verbindingen nodig te zijn door aanlanding in Noord-Brabant en/of Limburg. Of er nog meer aanlanding in de regio mogelijk is (dan de maximaal 4 aanlandingen die onderzocht zijn), voordat nieuwe ingrepen bij de 380kV-verbindingen nodig zijn, is niet bekend.

*Tabel 10-4 Beoordeling impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen Noord-Brabant en Limburg*

Effect	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
Minder ingrepen nodig dan bij referentie	Tot 4 aanlandingen	Tot 4 aanlandingen
Geen ingreep		
Beperkte/gemiddelde ingreep		
Grote ingreep		

#### 10.2.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor elektrische aanlanding in de regio Noord-Brabant en Limburg op de gehele elektriciteitsinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 10-5 Beoordeling elektrische aanlandingen Noord-Brabant en Limburg

Beoordeeld effect	Station Moerdijk	Station Tilburg	Station Maasbracht	Station Graetheide
<b>Energie-infrastructuur tot aansluitlocatie</b>	Grote lengte	Grote lengte	Grote lengte	Grote lengte
<b>Aansluitcapaciteit</b>	Geen ingreep tot twee aanlandingen. Grote ingreep bij meer dan twee aanlandingen.	Beperkte ingreep bij één aanlanding. Grote ingreep bij meer dan één aanlanding.	Grote ingreep	Geen ingreep tot twee aanlandingen. Grote ingreep bij meer dan twee aanlandingen
<b>Impact op HS-verbindingen</b>	Minder ingrepen nodig dan bij referentie tot minimaal vier aanlandingen, bij beide energetische scenario's			

De lengte van het kabeltracé vanaf het windpark op zee tot aan de potentiële aansluitlocaties in Noord-Brabant en Limburg is groot, wat betekent dat er veel nieuwe **energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie** nodig is. Met name bij diepe aanlanding in Tilburg, Maasbracht of Graetheide.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat bij de stations Moerdijk in Noord-Brabant en Graetheide in Limburg zonder ingrepen binnen het station twee elektrische aanlandingen aangesloten kunnen worden. Bij Tilburg zijn ingrepen binnen het station noodzakelijk om aanlandingen aan te kunnen sluiten. Bij Maasbracht is naar verwachting een nieuw station noodzakelijk voor het aansluiten van elektrische verbindingen.

#### Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

Elektrische aanlanding in Limburg of Noord-Brabant heeft een positief effect op de belasting van de **HS-verbindingen**. Naar verwachting kunnen door diepe aanlandingen in de regio Noord-Brabant en Limburg grote ingrepen bij HS-verbindingen voorkomen worden. Het is dus een afweging tussen extra (ondergrondse) energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie en extra bovengrondse HS-verbindingen, waarbij opgemerkt moet worden dat het bovengrondse HS-netwerk technisch gezien niet oneindig uitgebreid kan worden.

Voor een minimale belasting op de HS-verbindingen lijkt aansluiting van elektrische aanlandingen in zowel Noord-Brabant en Limburg gunstiger dan aanlanding in één van de twee regio's. Er lijken, bij de ontwikkelingen van de doorgerekende scenario's, tot minimaal vier elektrische aanlandingen mogelijk in Noord-Brabant en Limburg, zonder dat nieuwe ingrepen bij HS-verbindingen noodzakelijk zijn.

In Limburg wordt gekeken naar maximaal drie verbindingen. Dit lijkt ingepast te kunnen worden in het hoogspanningsnet zonder dat nieuwe ingrepen bij HS-verbindingen noodzakelijk zijn. Er is echter slechts aansluitcapaciteit voor twee verbindingen op de stations Maasbracht en Graetheide.

#### **Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?**

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marketingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marketingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## **10.3 Beoordeling elektrolyse**

### **10.3.1 Aansluitcapaciteit**

Grootschalige elektrolyzers moeten worden aangesloten op hoogspanningsstations. Hier moet voldoende aansluitcapaciteit voor beschikbaar zijn. Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in Noord-Brabant en Limburg vijf potentiële aansluitlocaties, de bestaande stations Maasbracht en Geertruidenberg en de geplande stations Moerdijk, Tilburg en Graetheide. Dit zijn allen 380kV-stations.

Bij de geplande stations Moerdijk, Tilburg en Graetheide kan naar verwachting grootschalige elektrolyse aangesloten worden zonder ingrepen, omdat er op de nieuwe stations veel vrije velden beschikbaar zijn. Deze velden kunnen in de toekomst echter ook voor andere klantaanvragen of netuitbreidingen gebruikt worden, dus dit beeld kan nog veranderen.

Bij de bestaande stations Geertruidenberg en Maasbracht zijn weinig vrije velden beschikbaar om nieuwe afnemers aan te sluiten en is de kans aanwezig dat deze velden voor andere klantaanvragen

of voor netuitbreidingen nodig zijn. Dat betekent dat het momenteel onzeker is of het aansluiten van grootschalige elektrolyse (groter dan 500 MW) mogelijk is. Dit geldt ook bij uitbreiding van deze bestaande stations. Gedetailleerder onderzoek op stationsniveau is noodzakelijk om te bepalen wat mogelijk is bij deze stations. Indien een aansluiting op het 380kV-station niet mogelijk is, dan kan het een optie zijn om een kleiner vermogen aan elektrolyse (kleiner dan 500 MW) aan te sluiten op een onderliggend 150kV-station, maar ook dit dient per station onderzocht te worden.

Tabel 10-6 Beoordeling aansluitcapaciteit elektrolyzers stations Noord-Brabant en Limburg

Effect	Station Geertruidenberg	Station Moerdijk	Station Tilburg	Station Maasbracht	Station Graetheide
Geen ingreep		X	X		X
Beperkte ingreep of onzeker					
Grote ingreep	X			X	

### 10.3.2 Impact op hoogspanningsverbindingen

Bij dit effect beoordelen we de impact van grootschalige elektrolyse op de belasting van de hoogspanningsverbindingen. Elektrolyzers hebben een, in veel gevallen positieve, impact op de hoogspanningsverbindingen doordat ze leiden tot extra elektriciteitsvraag bij de aansluitlocaties en bij de aansluitlocaties aan de kust knelpunten kunnen ontstaan door afvoer van overschotten van elektriciteit.

Elektrolyzers kunnen bij aansluitlocaties aan de kust bijdragen aan de inpassing van wind op zee. De situatie is bij diepe aanlanding (bij Tilburg en in Limburg) echter anders. We verwachten dat grootschalige elektrolyse bij diepe aanlanding, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk is en niet zal bijdragen aan het verminderen van belasting op de hoogspanningsverbindingen. Daarom geldt hier de beoordeling **negatief**. Het is naar verwachting efficiënter om de aangelande windstroom in Limburg en Tilburg door te voeren richting andere delen van Nederland of te exporteren richting België en Duitsland, en op andere locaties in Nederland (aan de kust) grootschalige elektrolyse toe te passen (en de benodigde waterstof via het waterstofnetwerk naar Tilburg en Limburg te transporteren)<sup>53</sup>.

Voor de regio Moerdijk/Geertruidenberg is realisatie van grootschalige elektrolyse vanuit het perspectief van systeemintegratie naar verwachting wel nuttig en wenselijk, aangezien beide bovenstaande redenen daar minder van toepassing zijn. Daarom geldt hier de beoordeling **positief**.

Tabel 10-7 Beoordeling impact op hoogspanningsverbindingen Noord-Brabant en Limburg

Score	Effect	Regio Moerdijk/Geertruidenberg	Diepe aanlanding Tilburg of Limburg
+	Positief	X	
0	Neutraal		
-	Negatief		X

<sup>53</sup> Het is daarnaast erg kostbaar om diepe aanlanding te realiseren. Dat roept de vraag op of het kosteneffectief is om elektriciteit van windparken op zee naar het binnenland te transporteren en vervolgens daar om te zetten in waterstof. Als de elektriciteit niet lokaal benut kan worden, of geëxporteerd kan worden, dan is het naar verwachting kosteneffectiever om minder diepe aanlandingen te realiseren.

### 10.3.3 Impact op waterstofinfrastructuur

De waterstof die geproduceerd met de elektrolyzers zal afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk (en deels lokaal benut worden). Bij het uitrolplan van het Waterstofnetwerk Nederland wordt rekening gehouden met plannen voor elektrolyse op land, en daarnaast met andere ontwikkelingen rondom waterstof (zoals waterstofimport en productie blauwe waterstof). Er wordt in het uitrolplan echter nog geen rekening gehouden met de ontwikkeling van grootschalige elektrolyzers bij Moerdijk en Geertruidenberg, en bij Tilburg of Limburg. Dit betekent dat het **onzeker** is of de geproduceerde waterstof van elektrolyzers afgevoerd kan worden met het voorziene waterstofnetwerk.

Tabel 10-8 Beoordeling impact elektrolyzers waterstofinfrastructuur

Effect	Impact op waterstofinfrastructuur
Geen ingreep	
Beperkte ingreep of onzeker	X
Grote ingreep	

### 10.3.4 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

In de omgeving van de potentiële aansluitlocatie **Geertruidenberg** staat de Amercentrale die de warmtenetten in Breda, Tilburg en naburige kleinere gemeenten van warmte voorziet via het Amernet. Alternatieve duurzame toekomstbestendige warmtebronnen zijn nodig als alternatief/aanvulling op de Amercentrale. RWE, de exploitant van de Amercentrale, heeft besloten per 2027 te stoppen met de warmtelevering aan het Amernet. Ennatuurlijk, de exploitant van het warmtenet, plant daarom ook de aanleg van de Brabantleiding naar Moerdijk om industriële restwarmte af te nemen voor 2027<sup>54</sup>. Door de aanleg van de Brabantleiding is er ook in omgeving van de potentiële aansluitlocatie **Moerdijk** potentieel voor de benutting van restwarmte van elektrolyzers, die dan ingevoerd kan worden op het Amernet. Er wordt voor dit warmtenet ook gekeken naar andere bronnen, zoals geothermie en elektrische boilers. Daarom is voor zowel Geertruidenberg als Moerdijk de beoordeling **positief**.

In de omgeving van de potentiële aansluitlocatie in **Tilburg** wonen veel mensen en is de warmtevraag van de gebouwde omgeving dus groot. Ook zijn er veel buurten in de omgeving reeds aangesloten op een warmtenet (ook deel van het Amernet). Dit betekent dat er naar verwachting potentieel is voor benutting van de restwarmte in de regio's. Daarom is de beoordeling **positief**. N.B. De restwarmte uit elektrolyse in deze gebieden ook concurreren met de industriële restwarmte uit Moerdijk die via de Brabantleiding beschikbaar wordt in de regio's.

In de omgeving van de potentiële aansluitlocatie in **Maasbracht** en **Graetheide** wonen minder mensen (respectievelijk in Roermond en in Sittard-Geleen) en is de warmtevraag van de gebouwde omgeving beperkter. Het bestaande warmtenet in Sittard-Geleen is ook een stuk kleinschaliger. Desondanks zijn er meerdere buurten in de omgeving waarvoor een warmtenet de laagste nationale

<sup>54</sup> <https://ennatuurlijk.nl/nieuws/een-versterkt-amernet-door-verdere-bronverduurzaming>

kosten heeft volgens de [startanalyse 2020](#). Dit betekent dat er een onzeker potentieel is voor benutting van de restwarmte in de regio's. Daarom is de beoordeling **neutraal**.

Tabel 10-9 Beoordeling mogelijkheid benutting restwarmte Noord-Brabant en Limburg

Score	Effect	Mogelijkheid benutting restwarmte Geertruidenberg	Mogelijkheid benutting restwarmte Moerdijk	Mogelijkheid benutting restwarmte Tilburg	Mogelijkheid benutting restwarmte Maasbracht	Mogelijkheid benutting restwarmte Graetheide
+	Positief	X	X	X		
0	Neutraal				X	X
-	Negatief					

### 10.3.5 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse pVAWOZ

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>55</sup>.
- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vergelijking van de huidige plannen met de aannames in de scenario's. Hierin kijken we alleen naar de regio Moerdijk/Geertruidenberg, aangezien elektrolyse in Tilburg en Limburg vanuit systeemintegratie naar verwachting niet noodzakelijk en wenselijk is. Bij Moerdijk en Geertruidenberg zijn er nog geen concrete plannen voor grootschalige elektrolyse. Daar is, ook zonder extra elektrische aanlanding in pVAWOZ, grootschalige elektrolyse wenselijk vanwege de geplande aanlanding van Nederwiek 3.

Tabel 10-10 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Moerdijk/Geertruidenberg	0 MW	700 – 1.900 MW	400 – 1.100 MW

<sup>55</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

### 10.3.6 Conclusies

De beoordeling van grootschalige elektrolyse in Noord-Brabant en Limburg is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 10-11 Beoordeling elektrolyzers Noord-Brabant en Limburg

Beoordeeld effect	Station Geertruidenberg	Station Moerdijk	Station Tilburg	Station Maasbracht	Station Graetheide
Aansluitcapaciteit	Grote ingreep	Geen ingreep	Geen ingreep	Grote ingreep	Geen ingreep
Impact op HS-verbindingen	Positief		Negatief		
Impact op waterstofinfrastructuur	Onzeker				
Mogelijkheid benutting restwarmte	Positief			Neutraal	
Bestaande plannen en noodzaak meer elektrolyse	Meer elektrolyse bovenop bestaande plannen wenselijk		Niet van toepassing, want grootschalige elektrolyse niet wenselijk		

Grootschalige elektrolyse is, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk bij diepe aanlanding in Tilburg en/of in Limburg. Dit komt doordat het naar verwachting efficiënter is om de aangelande windstroom in Limburg en Tilburg door te voeren richting andere delen van Nederland of te exporteren richting België en Duitsland, en op andere locaties in Nederland (aan de kust) grootschalige elektrolyse toe te passen<sup>56</sup>.

Voor aansluitlocaties Moerdijk en Geertruidenberg is realisatie van grootschalige elektrolyse vanuit het perspectief van systeemintegratie naar verwachting wel nuttig en wenselijk. Dit zal naar verwachting een positieve impact hebben op de belasting van de HS-verbindingen. Dit geldt ook zonder realisatie van extra elektrische aanlanding in pVAWOZ, vanwege de geplande aanlanding van Nederwiek 3. Daarnaast is er potentie om lokaal restwarmte van grootschalige elektrolyse te benutten. Bij Moerdijk en Geertruidenberg zijn er nog geen concrete plannen voor grootschalige elektrolyse (althans geen publiek bekende initiatieven, zie tekstbox in paragraaf 10.3.5).

Grootschalige elektrolyse kan naar verwachting aangesloten worden op het geplande station bij Moerdijk. Bij het bestaande station Geertruidenberg onzeker en is verder onderzoek op stationsniveau nodig om uitsluitsel te geven. Het is onzeker, ook bij uitbreiding van dit station, of de

<sup>56</sup> Het is daarnaast erg kostbaar om diepe aanlanding te realiseren. Dat roept de vraag op of het kosteneffectief is om elektriciteit van windparken op zee naar het binnenland te transporteren en vervolgens daar om te zetten in waterstof. Als de elektriciteit niet lokaal benut kan worden, of geëxporteerd kan worden, dan is het naar verwachting kosteneffectiever om minder diepe aanlandingen te realiseren.

geproduceerde waterstof van elektrolyzers op die locaties afgevoerd kan worden met het voorziene waterstofnetwerk.

Daar is, ook zonder extra elektrische aanlanding in pVAWOZ, grootschalige elektrolyse wenselijk vanwege de geplande aanlanding van Nederwiek 3.

## 10.4 Samenhang tussen elektrische aanlandingen en elektrolyzers

De elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen en verminderen de belasting op de HS-verbindingen bij Moerdijk en Geertruidenberg. Bij beide doorgerkende scenario's, met een verschillende hoeveelheid elektrolyse op land, kunnen echter wel evenveel elektrische aanlandingen ingepast worden zonder grote ingreep. Dit betekent dat de extra elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap (ten opzichte van het scenario Europese Integratie) niet zo'n grote impact heeft dat een extra elektrische aanlanding mogelijk is. Daarbij moet wel benoemd worden dat ook het scenario Europese Integratie, met relatief weinig elektrolyse en elektrificatie, uitgaat van een toename van elektrolyse en overige elektriciteitsvraag ten opzichte van de huidige plannen. Als er nog minder elektrolyse en/of elektrificatie dan in dit scenario komt, dan kan dat wel betekenen dat minder elektrische aanlandingen ingepast kunnen worden.
- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aanlanding, hoe meer elektrolyse gewenst is en vice versa. Er wordt in de doorrekening uitgegaan van maximaal 1.100 MW tot 1.900 MW elektrolyse, bij twee elektrische aanlandingen in de regio. Deze inschatting is gemaakt met de modellering van ii3050. In deze modellering is een inschatting gemaakt van een efficiënte hoeveelheid aan elektrolyzers, in Nederland en per regio, op basis van de lokale balans van vraag en aanbod.

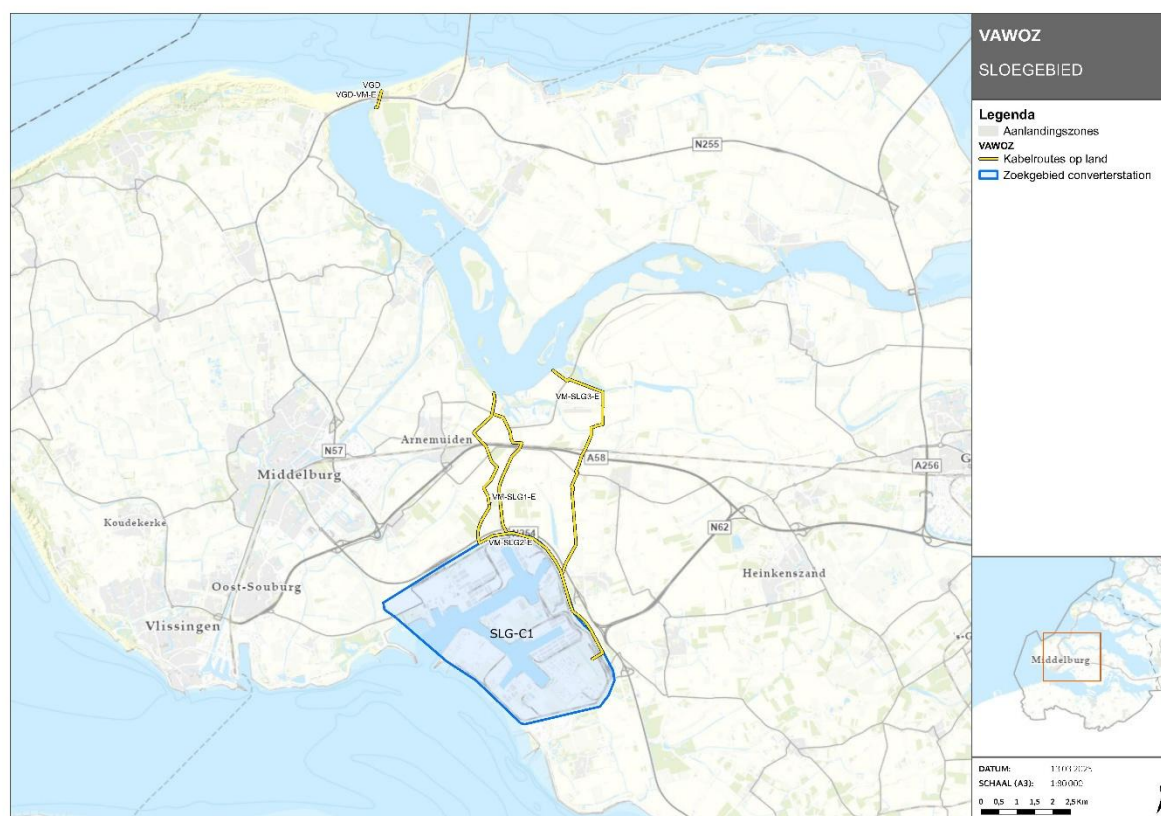
# 11 Beoordeling Zeeland

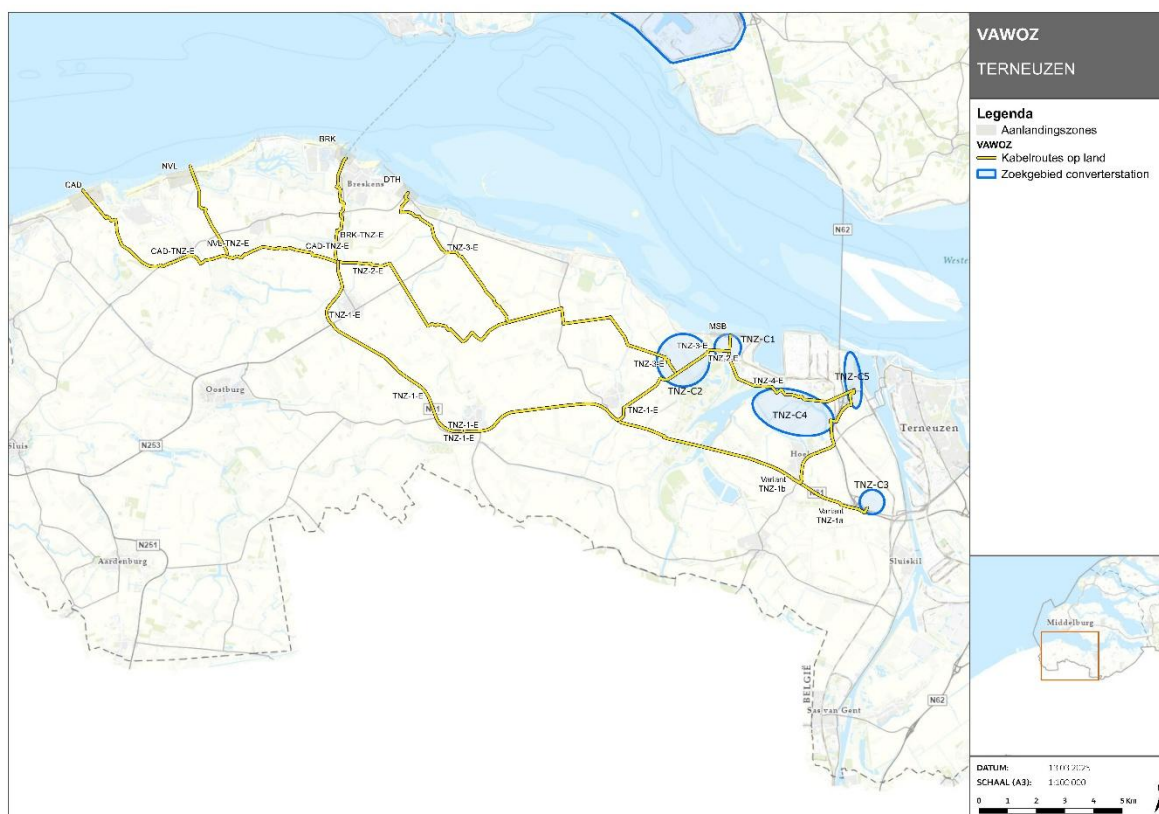
## 11.1 Omschrijving regio

Onder de regio Zeeland vallen de subregio's Midden-Zeeland en Zeeuws-Vlaanderen. Binnen systeemintegratie kijken we naar de gezamenlijke impact van deze twee regio's, gezien de onderlinge samenhang tussen de regio's (wat betreft impact op het energiesysteem).

### 11.1.1 Potentiële routes en aansluitlocaties

In Figuur 11-1 staan de potentiële oplossingsrichtingen voor elektrische routes voor de regio. De elektrische routes lopen richting de zoekgebieden voor de nieuw te bouwen 380kV-stations in het Sloegebied en bij Terneuzen. Sinds de ontwerpronde 3.0 wordt voor Zeeland niet meer gekeken naar waterstofaanlanding.





Figuur 11-1 Elektrische routes in Zeeland

### 11.1.2 Relevante aspecten voor systeemintegratie

In de routekaart windenergie op zee 21 GW staat 5,5 GW elektrische aanlanding gepland in deze regio, in het Sloegebied. Vanaf Borssele lopen, sinds de realisatie project Zuid-West 380kV West in 2025, twee 380kV-verbindingen met vier circuits richting Rilland naar Noord-Brabant en de rest van Nederland (en België). Begin jaren '30 staat de realisatie van een 380kV-verbinding tussen Borssele en Terneuzen gepland. Dan wordt ook Terneuzen een mogelijke locatie voor aanlanding van wind op zee. Daarnaast wordt een 380kV-verbinding vanaf Terneuzen richting Rilland gerealiseerd door dit in te lussen op één van de twee verbindingen vanaf Borssele naar Rilland. Er is dan sprake van een ruitstructuur waarbij er twee circuits vanaf Borssele naar Rilland lopen en twee circuits vanaf Terneuzen richting Rilland. Dan zijn er in totaal vier afvoerende 380kV-circuits vanaf Zeeland richting Noord-Brabant.

Er zit een wisselwerking tussen aanlanding in het Sloegebied en Terneuzen, aangezien de overschotten van beide gebieden via dezelfde 380kV-verbindingen richting de rest van Nederland getransporteerd worden. Hoe meer elektrische aanlanding plaatsvindt in Terneuzen, hoe minder mogelijk is in het Sloegebied en vice versa.

De onderstaande tabel geeft de kerncijfers voor vraag, aanbod en flexibiliteit in de regio Zeeland. De elektriciteitsvraag in de regio zal in 2040 volgens de gehanteerde scenario's 16 tot 19 TWh per jaar zijn. Hiervan komt meer ongeveer 80% van de industrie. De elektriciteitsvraag is dan gemiddeld 1,8-2,2 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische

aanlandingen zal voornamelijk doorgevoerd worden richting de rest van Nederland. De vraag is hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

Tabel 11-1 Kerncijfers vraag, aanbod en flexibiliteit Zeeland<sup>57</sup>

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
<b>Vraag en aanbod</b>		
<i>Elektriciteitsvraag</i>	16 TWh/1,8 GW	19 TWh/2,2 GW
<i>Wind op land</i>	900 MW	500 MW
<i>Zon-pv</i>	1.800 MW	1.500 MW
<i>Kernenergie</i>	1.000 MW	1.750 MW
<b>Flexibiliteit (afhankelijk van hoeveelheid elektrische aanlanding)</b>		
<i>Elektrolyzers</i>	2.500 tot 3.500 MW	1.450 tot 1.850 MW

De belangrijkste factoren die impact hebben op het aantal elektrische aanlandingen dat in Zeeland mogelijk is zijn:

- **Ontwikkeling elektrolyzers.** Deze zetten lokaal overschotten van elektriciteit om in waterstof, zodat deze niet doorgevoerd hoeven te worden richting de rest van Nederland. In beide scenario's is uitgegaan van een aanzienlijk vermogen aan elektrolyzers. Als deze niet gerealiseerd worden, dan zullen minder elektrische aanlandingen mogelijk zijn. De ontwikkeling van elektrolyse verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse is in meer detail naar de wisselwerking tussen elektrolyse en wind op zee gekeken (paragraaf 5.2).
- **Ontwikkeling van de elektriciteitsvraag van industrie.** Bij minder elektriciteitsvraag, bijvoorbeeld door krimp/vertrek van lokale industrie, is minder elektrische aanlanding mogelijk. Bij meer elektriciteitsvraag is meer elektrische aanlanding mogelijk. De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag verschilt tussen beide scenario's en in een gevoeligheidsanalyse hebben we specifiek gekeken naar de plannen van de CES (paragraaf 5.3).
- **Eventuele ontwikkeling kernenergie.** De lokale overschotten veroorzaakt door gelijktijdige productie van kerncentrales als windparken op zee moeten via dezelfde 380kV-verbindingen vanaf Zeeland richting de rest van Nederland getransporteerd worden. Hier hebben we in een gevoeligheidsanalyse naar gekeken (zie paragraaf 5.4).
- **Ontwikkeling DC-hub voor doorvoer stroom richting België.** Er is op dit moment al een interconnectie met België bij Rilland. Vanaf dit punt kunnen overschotten van elektriciteit, vanuit Zeeland, richting België geëxporteerd worden. Dat kan de afvoer van elektriciteit richting Noord-Brabant verminderen. Export (en import) bij dit interconnectiepunt wordt meegenomen in de analyses en daarmee de beoordeling. In Target Grid is ook het concept van een DC-hub in Zeeland opgenomen. Dit zou kunnen helpen om meer stroom naar België af te voeren. Hier is echter nog geen concreet plan voor en het lijkt echter onwaarschijnlijk dat dit voor 2040 al gerealiseerd wordt.

## 11.2 Beoordeling elektrische aanlandingen

### 11.2.1 Benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie

Er zijn verschillende mogelijke elektrische routes richting de twee aansluitlocaties in de regio Zeeland. Deze routes komen allemaal vanuit windpark 6/7. Vergeleken met de andere potentiële aansluitlocaties hebben de alternatieven richting Zeeland een grote lengte.

<sup>57</sup> De geografische afbakening bij deze cijfers is de provincie Zeeland.

Tabel 11-2 Beoordeling benodigde nieuwe energie-infrastructuur tot aansluitlocatie elektrische aanlandingen Zeeland

Effect	Station Sloegebied	Station Terneuzen
Korte lengte		
Gemiddelde lengte		
Grote lengte	X	X

### 11.2.2 Aansluitcapaciteit

Bij dit effect beoordelen we of er bij de 380kV-stations voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar is om de elektrische aanlandingen aan te sluiten. Hierbij is alleen het eindpunt van de routes, de aansluitlocatie, van belang.

Hierbij maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in de regio Zeeland twee potentiële aansluitlocaties. Dit zijn de geplande stations in het Sloegebied en in Terneuzen. Bij het 380kV-station in het Sloegebied kunnen naar verwachting één elektrische aanlanding aangesloten worden, zonder grote ingrepen. Bij meer dan één elektrische aanlandingen is in ieder geval een nieuw station nodig. Bij het geplande 380kV-station bij Terneuzen kunnen tot twee elektrische aanlandingen gerealiseerd worden, zonder uitbreidingen binnen het station. Bij meer dan twee aanlandingen is een nieuw 380kV-station nodig.

Er zit een limiet aan de hoeveelheid productie die op één station aangesloten kan worden. Als grootschalige kerncentrales gerealiseerd worden op een van deze stations, dan is het onzeker of er nog (voldoende) mogelijk is om elektrische aanlanding van wind op zee op dit station aan te sluiten.

De onderstaande capaciteit geeft het overzicht van de beoordeling van de aansluitcapaciteit van stations voor elektrische aanlanding in Zeeland.

Tabel 11-3 Beoordeling aansluitcapaciteit stations Zeeland

Effect	Station Sloegebied	Station Terneuzen
Geen ingreep	Eén aanlanding	Twee aanlandingen
Beperkte ingreep of onzeker		
Grote ingreep	Meer dan één aanlanding	Meer dan twee aanlandingen

### 11.2.3 Impact op afvoerende 380kV-verbindingen

De elektriciteit van de windparken op zee wordt deels in de regio gebruikt, maar wordt grotendeels doorgevoerd via hoogspanningsverbindingen. Bij dit effect beoordelen we de impact van de aanlanding van wind op zee op deze verbindingen en de ingrepen die nodig zijn om de windenergie

af te voeren. Hierbij maken we onderscheid tussen drie soorten ingrepen (meer toelichting in paragraaf 3.4.4):

- Geen ingreep noodzakelijk.
- Een operationele ingreep, met redispatch. Dit is een beperkte ingreep.
- Een grote ingreep. Zoals netverzwaring, systeemoplossing of een marketingreep (zie paragraaf 3.4.4).

Vanaf Borssele loopt op dit moment een 380 kV-verbinding met twee 380kV-circuits Rilland. Daarnaast zal een 380kV-verbinding tussen Borssele en Terneuzen gerealiseerd worden, en een 380kV-verbinding tussen Terneuzen en Rilland. Dan zijn er vier afvoerende 380kV-circuits vanaf Zeeland richting Noord-Brabant. De elektriciteitsvraag is dan gemiddeld 1,8-2,2 GW. Dit betekent dat de geplande aanlanding vanuit de routekaart windenergie op zee 21 GW al voldoende is voor het invullen van de lokale elektriciteitsvraag, zeker aangezien er ook nog opwek is van andere hernieuwbare bronnen (wind op land en zon-PV). De windstroom van extra elektrische aanlandingen zal voornamelijk doorgevoerd worden richting de rest van Nederland (en vanaf interconnectiepunt Rilland naar België). De vraag is hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is voordat de afvoercapaciteit van de 380 kV-circuits richting de rest van Nederland onvoldoende is.

In de doorrekeningen zijn configuraties met nul tot twee aanlandingen van 2 GW in Zeeland, bovenop de routekaart windenergie op zee 21 GW, doorgerekend voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, zie paragraaf 1.3.1). Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor de eventuele ontwikkeling van twee grote kerncentrales, de energievraag van de industrie en de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibiliteit.

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij het scenario Nationaal Leiderschap zijn **geen ingrepen** nodig voor de 380kV-verbindingen nodig in Zeeland tot twee aanlandingen. Bij het scenario Europese Integratie is één aanlanding mogelijk met **geen ingrepen** en twee aanlandingen met **beperkte ingrepen**.
- Het is onzeker wat de effecten zijn bij meer aanlanding in Zeeland aangezien dit niet doorgerekend is door TenneT.
- Bij realisatie van twee grote kerncentrales in Zeeland is één elektrische aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in beide energetische scenario's.
- In de CES 3.0 van SDR is een ambitie voor de ontwikkeling van elektrolyse vastgelegd die een 1,2 GW hoger ligt dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Als dit gerealiseerd wordt kan mogelijk een extra elektrische aanlanding ingepast worden, aangezien we verwachten dat er een sterke correlatie is tussen de afname van elektriciteit van elektrolyzers en het aanbod van wind op zee. Gezien de huidige ontwikkelingen rondom elektrolyse is het echter wel onzeker of deze hoge ambitie uit de CES 3.0 realistisch is.

Tabel 11-4 Beoordeling impact op afvoerende hoogspanningsverbindingen Zeeland

Effect	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Met twee grote kerncentrales
Geen ingreep	Twee aanlandingen	Bij één aanlandingen	Eén aanlanding
Beperkte ingreep		Twee aanlandingen	
Grote ingreep			Meer dan één aanlanding

### Potentiële impact Target Grid

Met Target Grid heeft TenneT een visie ontwikkeld op de ontwikkeling van hun hoogspanningsnetten, voorbij de zichtperiode van hun investeringsplannen en richting een klimaatneutraal energiesysteem in 2050.

In hun visie van Target Grid heeft TenneT ook de realisatie van een gelijkstroomnet in Nederland opgenomen met een onshore DC-hub in Zeeland met een koppeling met België. Een onshore DC-hub in Zeeland is niet onderzocht, maar zou extra aanlandingen in Zeeland mogelijk maken als (een groot deel van) de elektriciteit direct doorgevoerd wordt naar België. Hier is echter nog geen concreet plan voor en het lijkt echter onwaarschijnlijk dat dit voor 2040 al gerealiseerd wordt.

### 11.2.4 Conclusies

De beoordeling van de impact van de keuze voor elektrische aanlanding in de regio Zeeland op de algehele elektriciteitsinfrastructuur is samengevat in onderstaande tabel. Deze resultaten zijn geldig binnen de aannames van de gehanteerde scenario's (zie Tabel 11-1 voor gehanteerde aannames).

Tabel 11-5 Beoordeling elektrische aanlandingen Zeeland

Beoordeeld effect	Station Sloegebied	Station Terneuzen
Energie-infrastructuur tot aansluitlocatie	Grote lengte	Grote lengte
Aansluitcapaciteit	Geen ingreep bij één aanlanding. Grote ingreep bij meer dan één aanlanding.	Geen ingreep bij één of twee aanlandingen. Grote ingreep bij meer dan twee aanlandingen.
Impact op afvoerende HS-verbindingen	Twee aanlandingen zonder grote ingreep, in basisscenario's. Bij twee grote kerncentrales: één aanlanding zonder grote ingreep.	

De lengte van het kabeltracé vanaf het windpark op zee tot aan de potentiële aansluitlocaties in Zeeland is groot, wat betekent dat er veel nieuwe **energie-infrastructuur tot aan de aansluitlocatie** nodig is.

Voor de **aansluitcapaciteit** geldt dat bij het nieuwe station Terneuzen twee nieuwe elektrische aanlandingen aangesloten kunnen worden, zonder ingrepen aan het station. Bij het geplande station in het Sloegebied kan één aanlanding aangesloten worden zonder ingrepen. Er zit een limiet aan de hoeveelheid productie die op één station aangesloten kan worden. Als grootschalige kerncentrales gerealiseerd worden op een van deze stations, dan is het onzeker of er nog (voldoende) mogelijk is om elektrische aanlanding van wind op zee op dit station aan te sluiten.

### Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructuur, geen absolute waarheid

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructuur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van TenneT leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

Er kunnen in Zeeland, bij de ontwikkelingen van de doorgerekende scenario's, naar verwachting twee elektrische aanlandingen van 2 GW gerealiseerd worden zonder dat grote ingrepen bij de **HS-verbindingen** nodig zijn.

Een afhankelijkheid bij de impact van elektrische aanlandingen in Zeeland is de eventuele ontwikkeling van kernenergie. Bij realisatie van twee grote kerncentrales in Zeeland is één elektrische aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in beide energetische scenario's.

#### **Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?**

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marktingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marktingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## **11.3 Beoordeling elektrolyse**

### **11.3.1 Aansluitcapaciteit**

Grootschalige elektrolyzers moeten worden aangesloten op hoogspanningsstations. Hier moet voldoende aansluitcapaciteit voor beschikbaar zijn. Bij dit effect maken we onderscheid tussen twee soorten ingrepen: een uitbreiding binnen het bestaande of geplande station of aanleg van een nieuw station. In sommige gevallen kan namelijk binnen het bestaande station nog extra aansluitcapaciteit gerealiseerd worden en dit heeft de voorkeur boven realisatie van een nieuw station. Extra aansluitcapaciteit binnen het bestaande station wordt daarom ook beter beoordeeld.

Er zijn in Zeeland twee potentiële locaties voor grootschalige elektrolyzers, de nieuwe 380kV-stations in het Sloegebied en Terneuzen. Bij beide stations kan naar verwachting grootschalige elektrolyse aangesloten worden zonder ingrepen, omdat er op de nieuwe stations veel vrije velden beschikbaar zijn. Deze velden kunnen in de toekomst echter ook voor andere klantaanvragen of netuitbreidingen gebruikt worden, dus dit beeld kan nog veranderen.

Tabel 11-6 Beoordeling aansluitcapaciteit elektrolyzers stations Zeeland

Effect	Station Sloegebied	Station Terneuzen
Geen ingreep	X	X
Beperkte ingreep of onzeker		
Grote ingreep		

### 11.3.2 Impact op hoogspanningsverbindingen

Bij dit effect beoordelen we de impact van grootschalige elektrolyse op de belasting van de hoogspanningsverbindingen. Elektrolyzers hebben een, in veel gevallen positieve, impact op de hoogspanningsverbindingen doordat ze leiden tot extra elektriciteitsvraag bij de aansluitlocaties, waardoor minder elektriciteit afgevoerd dient te worden via de hoogspanningsverbindingen en deze minder belast worden. Dit beoordelen we voor de hele regio.

Grootschalige elektrolyse heeft in Zeeland een positief effect op de belasting van de hoogspanningsverbindingen, aangezien met name knelpunten op de 380kV-verbindingen plaatsvinden door afvoer van overschotten van windstroom en dat deze minder worden door inzet van grootschalige elektrolyse.

Elektrolyzers kunnen ook nieuwe knelpunten op hoogspanningsverbindingen veroorzaken, als ze ingezet worden op momenten met weinig productie van windparken op zee (maar bijvoorbeeld wel veel zonproductie in andere regio's). Dan leidt inzet van elektrolyzers tot extra transport richting de aansluitlocaties. Dit leidt in Zeeland naar verwachting niet tot nieuwe knelpunten. Dit komt doordat bij de hoogspanningsverbindingen tussen Zeeland richting de rest van Nederland alleen knelpunten ontstaan door afvoer van windstroom, en niet door aanvoer van elektriciteit op windluwe momenten.

Bovenstaande betekent dat elektrolyzers in Zeeland naar verwachting een positieve impact hebben op de belasting van hoogspanningsverbindingen, en geen nieuwe problemen veroorzaken. Hiermee kunnen ze bijdragen aan de inpassing van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet en is de beoordeling **zeer positief**.

Tabel 11-7 Beoordeling impact elektrolyzers op HS-verbindingen Zeeland

Score	Effect	Impact op HS-verbindingen
++	Zeer positief	X
+	Positief	
0	Neutraal	

### 11.3.3 Impact op waterstofinfrastructuur

De waterstof die geproduceerd met de elektrolyzers zal afgevoerd worden met het voorziene waterstofnetwerk (en deels lokaal benut worden). Bij het uitrolplan van het Waterstofnetwerk Nederland wordt rekening gehouden met plannen voor elektrolyse op land, en daarnaast met andere ontwikkelingen rondom waterstof (zoals waterstofimport en productie blauwe waterstof). Het vermogen waar rekening mee gehouden is in het uitrolplan ligt op de bovengrens van het vermogen aan elektrolyse in Zeeland in de doorgerekende scenario's (zie paragraaf 11.3.5). Daarmee kunnen de vermogens uit de doorgerekende scenario's naar verwachting ingepast worden zonder

ingrepen aan het WNL (bovenop de plannen uit het uitrolplan van het WNL en de uitbreidingen die richting 2040 in ieder geval nodig zijn, zie paragraaf 3.5.1). Dit geldt ook bij realisatie van de ambitie voor elektrolyse op land vanuit de CES 3.0, die hoger ligt dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's (zie paragraaf 5.3).

Tabel 11-8 Beoordeling impact elektrolyzers waterstofinfrastructuur Zeeland

Effect	Impact op waterstofinfrastructuur
Geen ingreep	X
Beperkte ingreep of onzeker	
Grote ingreep	

### 11.3.4 Mogelijkheid benutting restwarmte

Bij elektrolyse komen grote hoeveelheden restwarmte vrij. Vanuit energie-efficiëntie perspectief is het gunstig als deze restwarmte hergebruikt kan worden, voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

In de omgeving van de potentiële aansluitlocatie in Zeeland wonen weinig mensen en is de warmtevraag van de gebouwde omgeving beperkt. Desondanks zijn er meerdere buurten in de omgeving waarvoor een warmtenet de laagste nationale kosten heeft volgens de [startanalyse 2020](#). Dit betekent dat er een onzeker potentieel is voor benutting van de restwarmte in de regio. Daarom is de beoordeling **neutraal**. Aangezien er in Vlissingen en Middelburg twee keer zoveel woningen zijn als in Terneuzen, biedt die locatie het meeste waarde.

Tabel 11-9 Beoordeling mogelijkheid benutting restwarmte Zeeland

Score	Effect	Mogelijkheid benutting restwarmte Zeeland
+	Positief	
0	Neutraal	X
-	Negatief	

### 11.3.5 Bestaande plannen en noodzaak additionele elektrolyse pVAWOZ

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>58</sup>.
- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

<sup>58</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vergelijking van de huidige plannen met de aannames in de scenario's. In Zeeland is in ieder geval nog meer elektrolyse nodig bovenop de bestaande plannen om tot de aangenomen hoeveelheden uit de scenario's te komen. Daarnaast zijn de bestaande plannen nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is.

*Tabel 11-10 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's*

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Zeeland	0 – 900 MW	2.500 – 3.500 MW	1.450 – 1.900 MW

#### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

### 11.3.6 Conclusies

De beoordeling van grootschalige elektrolyse in Zeeland is samengevat in onderstaande tabel.

*Tabel 11-11 Beoordeling elektrolyzers Zeeland*

Beoordeeld effect	Station Sloegebied	Station Terneuzen
Aansluitcapaciteit	Geen ingreep	Geen ingreep
Impact op HS-verbindingen	Zeer positief	
Impact op waterstofinfrastructuur	Geen ingreep	
Mogelijkheid benutting restwarmte	Neutraal	
Bestaande plannen en noodzaak meer elektrolyse	Meer elektrolyse bovenop bestaande plannen wenselijk	

Grootschalige elektrolyse kan naar verwachting aangesloten worden bij de beide geplande 380kV-stations in het Sloegebied en bij Terneuzen. Het vermogen aan elektrolyse waar rekening mee gehouden is in het uitrolplan ligt op de bovengrens van het vermogen aan elektrolyse in Zeeland in de doorgerekende scenario's. Daarmee kunnen de vermogens uit de doorgerekende scenario's naar verwachting ingepast worden zonder ingrepen aan het WNL. Dit betekent dat het naar verwachting **mogelijk** is om grootschalige elektrolyse te realiseren in de regio.

Grootschalige elektrolyse in de regio heeft naar verwachting een positieve impact op de belasting van hoogspanningsverbindingen en kan daarmee bijdragen aan de integratie van elektrische aanlandingen in het hoogspanningsnet. Daarmee is grootschalige elektrolyse in de regio ook **gunstig**, bij elektrische aanlanding van wind op zee. De restwarmte, die geproduceerd wordt door elektrolyzers, kan mogelijk benut worden in de regio.

In Zeeland is in ieder geval nog meer elektrolyse nodig bovenop de bestaande plannen om tot de aangenomen hoeveelheden uit de scenario's te komen. Daarnaast zijn de bestaande plannen nog geen harde plannen waarvoor al een investeringsbeslissing genomen is.

## 11.4 Samenhang tussen elektrische aanlandingen en elektrolyzers

De elektrische aanlandingen en elektrolyzers worden los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de samenhang tussen deze componenten is:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen en verminderen de belasting op de HS-verbindingen. Bij beide doorgerekende scenario's, met een verschillende hoeveelheid elektrolyse op land, kunnen echter wel evenveel elektrische aanlandingen ingepast worden zonder grote ingreep. Dit betekent dat de extra elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap (ten opzichte van het scenario Europese Integratie) niet zo'n grote impact heeft dat een extra elektrische aanlanding mogelijk is. Daarbij moet wel benoemd worden dat ook het scenario Europese Integratie, met relatief weinig elektrolyse en elektrificatie, uitgaat van een toename van elektrolyse en overige elektriciteitsvraag ten opzichte van de huidige plannen. Als er nog minder elektrolyse en/of elektrificatie dan in dit scenario komt, dan kan dat wel betekenen dat minder elektrische aanlandingen ingepast kunnen worden.
- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aanlanding, hoe meer elektrolyse gewenst is en vice versa. Er wordt in de doorrekening uitgegaan van maximaal 1.850 tot 3.500 MW elektrolyse, bij twee elektrische aanlandingen in de regio. Deze inschatting is gemaakt met de modellering van ii3050. In deze modellering is een inschatting gemaakt van een efficiënte hoeveelheid aan elektrolyzers, in Nederland en per regio, op basis van de lokale balans van vraag en aanbod.

## 12 Conclusies

Dit rapport bevat de beoordeling Systeemintegratie de Integrale Effectenanalyse (IEA) van pVAWOZ. Het thema Systeemintegratie is één van de zes thema's van de IEA binnen het programma. In dit hoofdstuk bespreken we de belangrijkste conclusies van de beoordeling voor de elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers. Daarnaast bespreken we overkoepelende conclusies voor deze drie componenten. De analyses zijn uitgevoerd voor het zichtjaar 2040, het vooraf voorziene eindpunt van de tijdshorizon van het Programma VAWOZ<sup>59</sup>. De conclusies voor Toekomstvastheid vanuit Systeemintegratie bespreken we in hoofdstuk 13 van dit rapport.

### **Richtinggevend onderzoek naar impact wind op zee op energie-infrastructureur, geen absolute waarheid**

Het gaat bij de netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie expliciet om richtinggevende doorrekeningen, om de relatieve impact bij aanlanding op verschillende locaties in te schatten. Daarmee dienen deze doorrekeningen om afwegingen te maken tussen elektrische aanlanding van wind op zee verschillende regio's. Deze doorrekeningen geven geen overzicht van uitbreidingen die nodig zijn aan de energie-infrastructureur op land. Daarvoor zijn de investeringsplannen van de netbeheerders leidend.

De resultaten zijn geldig binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Scenario's en modellen geven inzicht in de mogelijke ontwikkelingen richting 2040, maar zijn geen absolute waarheid. Bij andere ontwikkelingen zal de impact van wind op zee op het elektriciteitsnet ook anders zijn. In verschillen- en gevoeligheidsanalyses hebben we de belangrijkste onzekerheden onderzocht (hoofdstuk 5).

### 12.1 Elektrische aanlandingen

#### **Diepe aanlandingen niet langer in pVAWOZ, inzichten systeemintegratie wel opgenomen in dit rapport**

In pVAWOZ is ook onderzoek gedaan naar diepe aanlandingen. Uitgangspunt voor pVAWOZ voor de zogenaamde 'diepe aanlandingen van wind op zee' naar Tilburg, Maasbracht en Graetheide was de situering van de benodigde kabels in de buisleidingenstrook van de Delta Rhine Corridor (DRC). De minister heeft in december 2024 echter besloten om gelijkstroomkabels uit de DRC te halen om snelheid te kunnen maken met de ontwikkeling van het waterstofnetwerk en een CO2 verbinding. Met het ontbreken van een tracé voor deze kabels zijn de onderzoeken naar diepe aanlandingen voor pVAWOZ komen te vervallen.

Daarom is door het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) een nieuw onderzoekstraject gestart voor aanlandingen van wind op zee diep landinwaarts. De inzichten over diepe aanlanding vanuit Systeemintegratie zijn echter nog wel opgenomen in dit rapport. In deze verkenning diepe aanlandingen worden ook de inzichten uit dit rapport meegenomen.

Uit de doorrekeningen van de verschillende configuraties volgt dat spreiding van de aanlanding over alle regio's tot een stuk minder ingrepen bij 380kV-verbindingen leidt dan clustering op enkele locaties. Dit heeft daarom vanuit het perspectief van systeemintegratie de voorkeur. Spreiding lijkt gunstiger uit te pakken om de volgende twee redenen:

- Elke regio heeft een maximale hoeveelheid aanlanding die mogelijk is voordat ingrepen bij de 380kV-verbindingen in de regio noodzakelijk zijn. Bij spreiding is het mogelijk om zoveel mogelijk binnen de maximale hoeveelheid aanlandingen te blijven, bij clustering niet.
- Clustering zorgt er ook voor dat er grotere ingrepen nodig zijn op verbindingen landinwaarts.

<sup>59</sup> Bij de beoordeling *Toekomstvastheid* wordt ook gekeken naar het tijdspad in de periode in 2031-2040 en wordt een doorkijk gegeven richting 2050. Deze inzichten zijn opgenomen in hoofdstuk 13.

Tabel 12-1 geeft een overzicht van de beoordelingen per regio. De tabel laat zien dat de capaciteit van 380kV-verbindingen de belangrijkste beperkende factor is bij de inpassing van de elektrische aanlandingen in het elektriciteitsnet op land. In principe is er in elke regio voldoende aansluitcapaciteit om het aantal elektrische aanlandingen dat ingepast kan worden aan te sluiten.<sup>60</sup>

Tabel 12-2 laat zien hoeveel elektrische aanlandingen minimaal en maximaal inpasbaar zijn per regio. Deze tabel laat zien dat het aantal elektrische aanlandingen dat inpasbaar is per regio, zonder grote ingrepen, in belangrijke mate afhankelijk is van overige ontwikkelingen. In deze tabel geven we een overzicht van het maximaal en minimaal aantal elektrische verbindingen dat per regio inpasbaar is. Daarbij bespreken we ook de belangrijkste afhankelijkheden en onzekerheden.

Tabel 12-1 Overzicht beoordeling per regio

Aansluitlocatie	Impact afvoerende 380kV-verbindingen	Route op zee	Aansluitcapaciteit
<b>Kop van Noord-Holland</b>	-Geen ingreep bij één aanlanding, twee 380kV-circuits voldoende. -Bij vier 380kV-circuits richting Kop van Noord-Holland tot drie aanlandingen, zonder (aanvullende) grote ingreep.		
NNHN-noord	-Onzekerheid door de in onderzoek zijnde Netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding maximaal één aanlanding zonder grote ingreep.	Kort/ gemiddeld	Twee aanlandingen zonder ingreep. Nader onderzoek nodig voor eventuele derde.
<b>Noord-Holland Zuid</b>	-Twee aanlandingen van 2 GW en één aanlanding van 700 MW zonder grote ingreep, in basisscenario's.		
A9-Zuid	-Onzekerheid door de in onderzoek zijnde Netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding maximaal één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland zonder grote ingreep.	Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
NNHN-zuid		Kort/ gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Vijfhuizen		Gemiddeld	Eén aanlanding met beperkte ingreep
Velsen		Kort	Eén 700 MW aanlanding met beperkte ingreep
<b>Zuid-Holland</b>	-Scenario Nationaal Leiderschap: twee of drie aanlandingen zonder grote ingreep.		
Simonshaven	-Scenario Europese Integratie: één of twee aanlandingen zonder grote ingreep.	Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Bleiswijk	-Bij twee grote kerncentrales <sup>61</sup> : nul of één aanlanding zonder grote ingreep.	Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Wateringen	-Onzekerheid door de in onderzoek zijnde Netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding maximaal één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland zonder grote ingreep.	Gemiddeld	Eén aanlanding zonder ingreep
Europoort		Gemiddeld	Twee aanlandingen zonder ingreep
<b>Zeeland</b>	-Twee aanlandingen zonder grote ingreep, in basisscenario's.		
Sloegebied	-Bij twee grote kerncentrales: één aanlanding zonder grote ingreep.	Lang	Eén aanlanding zonder ingreep
Terneuzen		Lang	Tot twee aanlandingen zonder ingreep.
<b>Noord-Brabant en Limburg</b>	Positieve impact op netbelasting tot vier elektrische verbindingen, voor alle onderzochte scenario's.		
Moerdijk		Lang	Twee aanlandingen zonder ingreep

<sup>60</sup> Al spelen daarbij natuurlijk ook nog overige aspecten die bij de andere thema's behandeld worden, zoals tijdige realisatie, technische haalbaarheid van de routes en beperkingen vanuit milieu en ruimte. Daarnaast moet voor iedere elektrische aanlanding infrastructuur op zee aangelegd worden. De effecten en beperkingen hiervoor worden bij andere thema's behandeld.

<sup>61</sup> Small Modular Reactors (SMR's) zijn niet meegenomen in de analyses, alleen grootschalige kerncentrales.

Tilburg		Lang	Eén aanlanding met beperkte ingreep
Maasbracht		Lang	Geen aanlanding zonder grote ingreep
Graetheide		Lang	Twee aanlandingen zonder ingreep
<b>Noord-Nederland</b>	-Twee of drie aanlandingen mogelijk zonder grote ingreep, in basisscenario's		
Oostpolder	-Bij twee grote kerncentrales: één aanlanding zonder grote ingreep.	Kort/ gemiddeld	Tot vier aanlandingen mogelijk zonder grote ingreep. Onderzoek nodig of vier aanlandingen mogelijk zijn vanuit beheersbaarheid en systeemstabiliteit.

Tabel 12-2 Maximaal en minimaal inpasbaar aantal elektrische verbindingen per regio

Configuratie	Maximaal inpasbaar, zonder grote ingrepen	Belangrijkste afhankelijkheden en onzekerheden	Minimaal inpasbaar tot 2040, zonder grote ingrepen
<b>Kop van Noord-Holland</b>	3 elektrische en aanlandingen in kop van Noord-Holland	Samenhang met Noord-Holland Zuid (max 4 in heel Noord-Holland), Randstad uitbreiding en NNHN	1 elektrische aanlanding
<b>Noord-Holland Zuid</b>	en 2 van 2 GW en 1 van 700 MW in Noord-Holland Zuid. Maximaal 4 van 2 GW en 1 van 700 MW in Noord-Holland als geheel.	Samenhang met Noord-Holland Zuid (max 4 in heel Noord-Holland), Randstad uitbreiding	1 elektrische aanlanding in één van beide regio's
<b>Zuid-Holland</b>	2 tot 3 elektrische aanlandingen	Kernenergie, ontwikkeling elektriciteitsvraag en elektrolyse, Randstad uitbreiding	
<b>Zeeland</b>	2 elektrische aanlandingen	Kernenergie	1 elektrische aanlanding
<b>Noord-Brabant en Limburg</b>	4 elektrische aanlandingen	Tijdige realisatie diepe aanlanding, niet meer in pVAWOZ.	2 elektrische aanlandingen
<b>Noord-Nederland</b>	2 tot 3 elektrische aanlandingen	Kernenergie, import en loop-flows via Meeden	1 elektrische aanlanding
<b>Totaal</b>	<b>14 tot 17 elektrische aanlandingen</b>		<b>6 elektrische aanlandingen</b>

Uit

Tabel 12-2 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het maximaal aantal elektrische aanlandingen dat per regio ingepast kan worden zonder grote ingrepen is in theorie voldoende voor het realiseren van 10 elektrische aanlandingen. Maar er zijn in elke regio belangrijke afhankelijkheden en onzekerheden, die ertoe kunnen leiden dat minder elektrische aanlandingen zonder grote ingrepen inpasbaar kunnen worden. De belangrijkste onzekerheden en afhankelijkheden zijn de ontwikkeling van grote kerncentrales, de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag en flexibiliteit en de (tijdige) realisatie van netuitbreiding in de Randstad (zie paragraaf 5.5).
  - Een belangrijke onzekerheid voor elektrische aanlanding in Noord- en Zuid-Holland is de realisatie van de netuitbreiding in de Randstad. Zonder deze uitbreiding is elektrische aanlanding in deze regio's uitdagend en lijkt slechts één aanlanding in de kop van Noord-

Holland en één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland mogelijk. Deze netuitbreiding is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker.

- De ontwikkeling van twee grote kerncentrales heeft impact op de hoeveelheid elektrische aanlanding die zonder grote ingrepen mogelijk is in de regio's Zuid-Holland, Zeeland en Noord-Nederland.
- Deze afhankelijkheden en onzekerheden zorgen ervoor dat het lastig is om te bepalen wat, vanuit systeemintegratie, de meest optimale verdeling is van de elektrische aanlandingen. Het is daarom belangrijk om de bevindingen periodiek te herijken en waar mogelijk meer duidelijkheid te creëren, en bijvoorbeeld de programmering van de nieuwe kerncentrales en wind op zee gezamenlijk op te pakken.
- Er zijn vanuit systeemintegratie zes elektrische aanlandingen die in alle onderzochte scenario's en gevoeligheidsanalyses inpasbaar lijken zonder grote ingrepen. Het gaat om één aanlanding in Zeeland, twee elektrische aanlandingen bij Moerdijk/Geertruidenberg, één aanlanding in de Eemshaven, één aanlanding in de kop van Noord-Holland en één aanlanding in Noord-Holland Zuid of Zuid-Holland. Er is voor deze aanlanding naar verwachting ook voldoende aansluitcapaciteit beschikbaar. Dit zijn dus, vanuit systeemintegratie bezien, no-regrets.
- Diepe aanlanding naar Tilburg en/of Limburg valt niet meer in de scope van pVAWOZ, maar vanuit de beoordeling systeemintegratie zien we wel reden om op diepe aanlandingen in te blijven zetten. In alle regio's zijn er uitdagingen voor de inpassing van elektrische aanlandingen, dus daarmee maakt diepe aanlanding het makkelijker om maximaal tien elektrische aanlandingen te realiseren. Daarnaast kan dit de belasting op de 380kV-verbindingen in Noord-Brabant en Limburg verminderen.
- Alle analyses die gedaan zijn gaan uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag en flexibele bronnen (zoals elektrolyse) richting 2040. Het is belangrijk dat deze vraag en flexibiliteit er ook komt. Anders zijn minder elektrische aanlandingen inpasbaar. Dat geldt ook voor de no-regrets vanuit systeemintegratie bezien.
- De tabel geeft een overzicht hoeveel elektrische aanlandingen inpasbaar zijn zonder grote ingreep. In principe is het niet onmogelijk om meer elektrische aanlandingen in te passen, er zijn dan verschillende grote ingrepen mogelijk (zie onderstaand kader). Maar elk van deze grote ingrepen is erg uitdagend en/of heeft een forse maatschappelijke kosten.

### Wat zijn de mogelijke grote ingrepen bij de HS-verbindingen?

Er is een grote ingreep noodzakelijk bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit van 380kV-verbindingen. In dat geval is redispatch, wat we classificeren als een beperkte ingreep, technisch niet meer mogelijk. Er zijn verschillende grote ingrepen bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit:

- **Netverzwaring.** Dit is de gangbare oplossing bij een ernstige overschrijding van de transportcapaciteit. Echter, het zou dan gaan om een additionele verzwaring bovenop de uitbreidingen die al opgenomen zijn in het investeringsplan van TenneT (die al meegenomen worden in de doorrekeningen) en waar nog geen plannen voor zijn. Het is daarmee zeer uitdagend om deze ingreep voor 2040 te realiseren.
- **Systeemoplossingen.** Dit zijn oplossingen vanuit de inrichting van het energiesysteem. Met name het realiseren van meer lokale (flexibele) elektriciteitsvraag is dan een kansrijke oplossing, aangezien dan een groter deel van de productie van wind op zee lokaal benut wordt. De scenario's gaan echter al uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, en dit zou nog additioneel moeten zijn ten opzichte van de toename in de scenario's.
- **Marktingrepen.** Dit kan bijvoorbeeld met een verplicht tijdsduurgebonden transportrecht voor de windparken op zee, waarbij de windparken op zee op momenten dat overschrijding dreigt niet mogen invoeden en moeten afschakelen. Het gaat hierbij om andere ingrepen dan redispatch, wat ook een marktingreep van TenneT is. Dat zien we als een beperkte ingreep.

Voor alle drie deze ingrepen moet per situatie in meer detail onderzocht worden of en in welke mate deze de ernstige overschrijding van de capaciteit van 380kV-verbindingen oplost, en of het haalbaar is. Dat valt buiten de scope van de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ. Hierin identificeren we alleen of een grote ingreep noodzakelijk is.

## 12.2 Waterstofaanlandingen

De resultaten van de beoordeling van de impact van waterstofaanlanding op de waterstofinfrastructuur voor de verschillende regio's en bijbehorende aansluitlocaties zijn samengevat in Tabel 12-3.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken uit de beoordeling van de verschillende aanlandregio's voor waterstofaanlanding:

- Een aanlanding Eemshaven, Grijpskerk of Kop van Noord-Holland leidt tot de minste ingrepen.
- Aanlanding in de Kop van Noord-Holland en Grijpskerk is afhankelijk van tijdige realisatie van het uitrolplan van het Waterstofnetwerk Nederland, met name van de IJsselmeerroute. Hiervoor is nog geen projectprocedure gestart en deze route heeft ook nog geen P50 of P90-planning<sup>62</sup>. Voor een buisleiding richting Grijpskerk kan waarschijnlijk een bestaande leiding gebruikt worden, waarvan realisatie in de eerste helft van de jaren '30 haalbaar lijkt.
- Bij waterstofaanlanding in Noord-Holland Zuid en de Eemshaven is de route vanaf de kust naar het Waterstofnetwerk complex en onzeker.
- Waterstofaanlanding in Zuid-Holland komt duidelijk als het meest ongunstig naar voren uit de beoordeling, aangezien bij aanlanding in die regio een grote ingreep nodig is aan het WNL. Daarnaast is het een lange route op zee en is de realisatie aansluitleiding vanaf de kust tot aan het WNL erg complex.

<sup>62</sup> Dit houdt in dat ingeschat wordt dat het project met respectievelijk 50% of 90% zekerheid op die datum gerealiseerd kan worden.

Tabel 12-3 Beoordeling impact waterstofaanlanding op waterstofinfrastructuur

Regio	Aansluitlocatie	Impact op infrastructuur op zee	Impact op infrastructuur op land tot landelijk netwerk	Impact op Waterstofnetwerk Nederland (WNL)
Kop van Noord-Holland	Kop van Noord-Holland	Korte route	Kleine ingreep met weinig risico	Geen ingreep, maar afhankelijk van IJsselmeerroute WNL
Noord-Holland Zuid	Noordzeekanaalgebied	Korte route	Ingreep met groot risico	Geen ingreep
Zuid-Holland	Maasvlakte	Lange route	Ingreep met groot risico	Grote ingreep
Noord-Nederland	Eemshaven	Korte of gemiddelde route	Kleine ingreep met gemiddeld risico	Geen ingreep
	Grijpskerk		Gemiddelde ingreep met klein risico	Geen ingreep, maar afhankelijk van IJsselmeerroute of alternatieve route WNL

Bij de beoordeling hebben we naar de effecten van waterstofaanlanding tot 2040 gekeken. Bij het thema *Toekomstvastheid* (hoofdstuk 13) wordt ook een doorkijk gegeven naar de effecten van waterstofaanlanding op de energie-infrastructuur op land richting 2050. Dan zal meer waterstof aan land gebracht worden en zijn de effecten op het waterstofnetwerk groter. Dus het is noodzakelijk om met de keuze voor 2040 rekening te houden met de benutting van deze buisleiding in 2050.

Random offshore elektrolyse en waterstofaanlanding spelen ook nog overkoepelende onzekerheden. Belangrijke aspecten hierbij zijn onder meer haalbaarheid van tijdige realisatie van waterstofaanlandingen (meer hierover in beoordeling *Toekomstvastheid*, hoofdstuk 13), de vraag of er wel voldoende vraag naar groene waterstof in Nederland en of dit kan concurreren met bijvoorbeeld import en de vraag of offshore elektrolyse kan concurreren met elektrolyse op land. Deze aspecten zijn niet van belang bij de afweging tussen regio's en vallen buiten de scope van pVAWOZ, maar bepalen wel of offshore elektrolyse en waterstofaanlanding tijdig van de grond komen. Meer hierover is te vinden in paragraaf 2.2.

### 12.3 Grootschalige elektrolyzers op land

Voor systeemintegratie is een losse beoordeling uitgevoerd voor elektrolyzers. Hierbij ligt de focus op grootschalige elektrolyzers die direct aangesloten worden op 380kV-stations (vanaf ongeveer 500 MW), aangezien de convertorstations voor elektrische aanlandingen van wind op zee ook op 380kV-stations aangesloten worden<sup>63</sup>.

Elektrolyzers produceren waterstof uit (overschotten van) elektrolyzers en kunnen op die manier bijdragen aan de integratie van elektrische aanlandingen van wind op zee. De focus van de beoordeling van de elektrolyzers ligt op de potentiële gunstige impact op elektrische aanlandingen en op de haalbaarheid. Echter, voor de ontwikkeling van elektrolyzers is wel van belang dat er voldoende vraag is naar (binnenlands geproduceerde) groene waterstof. Als die vraag er niet komt, dan zal er geen afzetmarkt zijn voor exploitanten van elektrolyzers en zullen deze er naar verwachting ook niet komen. Dit valt echter buiten de scope van pVAWOZ en wordt daarom niet onderzocht.

Tabel 12-4 geeft een overzicht van de uitkomsten van de beoordeling voor elektrolyzers voor de verschillende regio's. De belangrijkste conclusies zijn:

<sup>63</sup> Met uitzondering van de potentiële 700 MW aanlanding in Velsen vanuit HKW8.

- In de Kop van Noord-Holland, Noord-Holland Zuid, Zuid-Holland, Zeeland en Noord-Nederland hebben elektrolyzers naar verwachting een gunstige impact op de belasting van HS-verbindingen en is realisatie van elektrolyzers gunstig voor systeemintegratie.
- Voor aansluitlocaties Moerdijk en Geertruidenberg is realisatie van grootschalige elektrolyse vanuit het perspectief van systeemintegratie naar verwachting ook nuttig en wenselijk.
- Grootschalige elektrolyse is, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk bij diepe aanlanding (in Tilburg en/of in Limburg). Dit komt doordat het naar verwachting efficiënter is om de aangelande windstroom in Limburg en Tilburg door te voeren richting andere delen van Nederland of te exporteren richting België en Duitsland, en op andere locaties in Nederland (aan de kust) grootschalige elektrolyse toe te passen<sup>64</sup>.
- Grootschalige elektrolyse lijkt (met de huidige inzichten) aangesloten te kunnen worden op alle nieuwe 380kV-stations. Bij de bestaande 380kV-stations is minder aansluitcapaciteit beschikbaar en is dit uitdagender, voor zekerheid is een detailanalyse op stationsniveau nodig. Voor kleinere elektrolyzers (kleiner dan 500 MW) kan ook gekeken worden naar aansluiten op 150kV-stations.
- In de Kop van Noord-Holland, Noord-Holland Zuid, Zeeland, Noord-Brabant en Noord-Nederland kunnen elektrolyzers naar verwachting ingepast worden in de waterstofinfrastructuur zonder ingrepen. In Zuid-Holland zal in ieder geval grootschalige elektrolyse ingepast kunnen worden, maar is het onzeker of de bovengrens aan elektrolyse uit de doorgerekende scenario's ingepast kan worden in het waterstofnetwerk zonder ingrepen.
- Bij Noord-Holland Zuid, Zuid-Holland en Noord-Brabant is er naar verwachting potentie voor benutting van de geproduceerde restwarmte. In Limburg en Zeeland mogelijk ook, al is dit onzeker.

Tabel 12-4 Totale beoordeling elektrolyzers

Aansluitlocatie	Aansluitcapaciteit	Impact HS-verbindingen	Impact waterstof-infrastructuur	Mogelijkheid benutting restwarmte
<b>Kop van Noord-Holland</b>		Zeer positief	Geen ingreep, afhankelijk van realisatie projecten WNL waarvoor projectprocedure nog moet starten.	Neutraal
NNHN-noord	Geen ingrepen			
<b>Noord-Holland Zuid</b>		Positief	Geen ingrepen	Positief
A9-Zuid	Geen ingrepen			
NNHN-zuid	Geen ingrepen			
Vijfhuizen	Grote ingreep			
Velsen	Grote ingreep			
<b>Zuid-Holland</b>		Positief	In ieder geval fors vermogen zonder ingrepen. Onzeker of bovengrens scenario's inpasbaar is.	Positief
Simonshaven	Grote ingreep			
Bleiswijk	Grote ingreep			
Wateringen	Grote ingreep			
Europoort	Geen ingrepen			
<b>Noord-Brabant en Limburg</b>		Positief bij Moerdijk en Geertruidenberg. Negatief bij Tilburg, Maasbracht en Graetheide.	Geen ingrepen	
Geertruidenberg	Grote ingreep			Positief
Moerdijk	Geen ingrepen			
Tilburg	Geen ingrepen			
Maasbracht	Grote ingreep			Neutraal

<sup>64</sup> Het is daarnaast erg kostbaar om diepe aanlanding te realiseren. Dat roept de vraag op of het kosteneffectief is om elektriciteit van windparken op zee naar het binnenland te transporteren en vervolgens daar om te zetten in waterstof. Als de elektriciteit niet lokaal benut kan worden, of geëxporteerd kan worden, dan is het naar verwachting kosteneffectiever om minder diepe aanlandingen te realiseren.

Graetheide	Geen ingrepen			
<b>Zeeland</b>		Zeer positief	Geen ingrepen	Neutraal
Slogebied	Geen ingrepen			
Terneuzen	Geen ingrepen			
<b>Noord-Nederland</b>		Zeer positief	Geen ingrepen	Neutraal
Oostpolder	Geen ingrepen			

In elk van de scenario's en aanlandconfiguraties wordt uitgegaan van ontwikkeling van elektrolyse. De totale hoeveelheid elektrolyse in Nederland verschilt tussen de twee energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie), maar is gelijk voor verschillende aanlandconfiguraties. De verdeling van de elektrolysecapaciteit over de verschillende regio's is wel afhankelijk van de aanlandconfiguratie: bij meer elektrische aanlanding in een regio wordt ook uitgegaan van meer elektrolyse (aangezien dan meer elektrolyse ook wenselijk is).

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu ook al plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. Voor de meeste van deze plannen is echter nog geen investeringsbeslissing genomen. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>65</sup>.
- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

De onderstaande tabel geeft een vergelijking tussen de huidige plannen en de bandbreedte voor elektrolyse in de scenario's.

*Tabel 12-5 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's*

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
<b>Kop van Noord-Holland</b>	0 MW	400 – 1.750 MW	100 – 900 MW
<b>Noord-Holland Zuid</b>	0 – 600 MW	650 – 700 MW	400 MW
<b>Zuid-Holland</b>	200 – 2.100 MW	3.000 – 5.500 MW	1.900 – 3.200 MW
<b>Zeeland</b>	0 – 900 MW	2.500 – 3.500 MW	1.450 – 1.900 MW
<b>Noord-Nederland</b>	0 – 1.000 MW	1.000 – 3.900 MW	500 – 2.000 MW
<b>Moerdijk/Geertruidenberg</b>	0 MW	700 – 1.900 MW	400 – 1.100 MW
<b>Totaal van regio's</b>	<b>200 – 4.500 MW</b>		

Uit de tabel kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij realisatie van de bovengrens van de huidige plannen komt het vermogen in de meeste regio's al in de buurt (of bij de onderkant van de bandbreedte) van het scenario Europese Integratie. De impliceert dat de aannames in dit scenario haalbaar lijken bij realisatie van de bestaande plannen. Echter, de huidige plannen zijn erg onzeker omdat er nog vrijwel geen definitieve investeringsbeslissingen genomen zijn. Voor de vermogens aan elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap is nog een forse toename nodig boven op de bestaande plannen.
- In Noord-Holland Zuid is de bovengrens van de huidige plannen vrijwel gelijk aan de aannames in de scenario's.

<sup>65</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is slechts een modeluitkomst is en geen absolute waarheid.

- In Zuid-Holland en Noord-Nederland is de bovengrens van de huidige plannen gelijk aan de aangenomen hoeveelheden bij het scenario Europese Integratie met weinig extra aanlanding van wind op zee. Bij meer aanlanding van wind op zee en bij het scenario Nationaal Leiderschap is de aangenomen hoeveelheid elektrolyse wel meer dan (de bovengrens van) de huidige plannen.
- In Zeeland, de Kop van Noord-Holland en Moerdijk/Geertruidenberg is in ieder geval nog meer elektrolyse nodig boven op de bestaande plannen om tot de aangenomen hoeveelheden uit de scenario's te komen.

#### **Inschatting bestaande plannen elektrolyzers**

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen (ondergrens van bandbreedte).

## 12.4 Samenhang tussen elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyse

De elektrische aanlandingen, waterstofaanlandingen en elektrolyzers zijn los beoordeeld, maar er zit ook een samenhang tussen deze verschillende componenten van het energiesysteem. De belangrijkste conclusies over de samenhang tussen deze componenten zijn:

- Grootschalige elektrolyzers kunnen bijdragen aan de inpassing van de elektrische aanlandingen, in de regio's waarnaar gekeken wordt voor elektrische aanlanding<sup>66</sup>. Ook andere flexibele bronnen, of de basisvraag naar elektriciteit, kunnen hiertoe ook bijdragen. Uiteindelijk gaat het er primair om dat het gunstig is om zoveel mogelijk elektriciteit lokaal te benutten. In de doorgerekende toekomstscenario's nemen we een forse toename van de hoeveelheid elektrolyse en (flexibele) elektriciteitsvraag aan. De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag zal ook noodzakelijk zijn om de elektrische aanlandingen te kunnen inpassen. Een uitgebreide beschouwing op de impact van elektrolyse en andere flexibiliteit is te vinden in paragraaf 5.2 en bijlage B *Verschillen- en gevoeligheidsanalyse*.
- Het is daarom van belang om de ontwikkeling van aanbod van elektriciteit (van elektrische aanlandingen) en de elektriciteitsvraag (van onder meer elektrolyse) in samenhang te bekijken. Hoe meer elektrische aanlanding, hoe meer (flexibele) elektriciteitsvraag gewenst is en vice versa.
- Dezelfde regio's worden gebruikt voor grootschalige elektrolyzers op land, bij aansluitlocaties van elektrische aanlandingen, en waterstofaanlandingen. Dezelfde waterstofleidingen worden gebruikt voor het transport van waterstofaanbod van grootschalige elektrolyse op land en waterstofaanlandingen richting het Waterstofnetwerk Nederland en via het Waterstofnetwerk Nederland richting de rest van Nederland. In de meeste regio's heeft het voorziene Waterstofnetwerk Nederland voldoende capaciteit om beide ontwikkelingen te faciliteren.

---

<sup>66</sup> Alleen bij diepe aanlanding bij Tilburg of in Limburg is dit niet het geval, maar dit wordt niet meer meegenomen in pVAWOZ.

## 13 Toekomstvastheid – relevante inzichten systeemintegratie

### Samenhang met bijlage G Achtergrondrapport Toekomstvastheid

Deze paragraaf moet worden gelezen in samenhang met het rapport Toekomstvastheid, te vinden in bijlage G bij de IEA. Hierin wordt totaalbeeld rondom het tijdspad geschetst wordt (breder dan alleen systeemintegratie).

Bij de het onderdeel Systeemintegratie beoordelen we de impact van aanlanding van wind op zee op het energiesysteem voor het jaar 2040, het vooraf voorziene eindpunt van de zichtperiode van pVAWOZ. Echter, de tijdscomponent is ook cruciaal bij de uitrol van wind op zee. Daarbij is zowel de uitrol gedurende de zichtperiode van pVAWOZ van belang als de doorkijk na 2040. Deze tijdscomponent wordt beoordeeld in het rapport Toekomstvastheid (bijlage G). Systeemintegratie is hierbij ook een belangrijke factor. Om een compleet beeld te schetsen van alle relevante aspecten rondom Systeemintegratie geven we in dit hoofdstuk een overzicht van de relevante inzichten voor Systeemintegratie met betrekking tot toekomstvastheid. Deze inzichten zijn ook te vinden in het rapport Toekomstvastheid (bijlage G), waar een totaalbeeld rondom het tijdspad geschetst wordt (breder dan alleen systeemintegratie).

### 13.1.1 Relevante aspecten voor uitrol wind op zee opgave pVAWOZ

De vijf belangrijkste aspecten vanuit het perspectief van systeemintegratie voor het uitrolpad van wind op zee in de zichtperiode van pVAWOZ zijn:

- Ontwikkeling techniek.
- Ontwikkeling vraag en aanbod elektriciteit en waterstof per regio.
- Ontwikkeling vraag en aanbod elektriciteit en waterstof in Nederland.
- Tijdige realisatie benodigde energie-infrastructuur tot aan aansluiting.
- Tijdige realisatie benodigde energie-infrastructuur op land.

Hieronder bespreken we elk van deze punten.

#### Ontwikkeling techniek

De benodigde technieken om aanlandingen te realiseren moeten op tijd beschikbaar zijn en op grote schaal toegepast kunnen worden. Dit is met name relevant voor de waterstofaanlandingen. Hiervoor is namelijk grootschalige offshore elektrolyse noodzakelijk. Dit wordt op dit moment nog niet toegepast en het is onzeker op welke termijn dit wel op grote schaal haalbaar gaat zijn. Demonstratieprojecten voor waterstofproductie op zee kunnen hier uitsluitsel over geven.

Bij elektrische aanlandingen is technische haalbaarheid geen probleem, aangezien in de routekaart windenergie op zee 21 GW al AC- en DC-aanlandingen gerealiseerd worden, en deze technieken ook na 2031 toegepast worden. Diepe aanlanding wordt op dit moment in Nederland nog niet toegepast, maar wel in andere landen (zoals Duitsland). Daarom is het de verwachting dat dit technisch haalbaar is voor de zichtperiode van pVAWOZ.

#### Ontwikkeling vraag en aanbod elektriciteit en waterstof per regio

De ontwikkelingen rondom wind op zee staan niet op zichzelf. Het hele energiesysteem zal ingrijpend veranderen richting 2040. Overige ontwikkelingen, naast wind op zee, in het energiesysteem hebben een impact op de systeemintegratie van wind op zee, met name op de

impact van wind op zee op het elektriciteitssysteem. Zo zorgt extra elektriciteitsvraag in de regio, ofwel directe elektriciteitsvraag of flexibele elektriciteitsvraag van bijvoorbeeld elektrolyzers, voor extra directe benutting van elektriciteit in de regio. Dan hoeft in de meeste gevallen minder windstroom via de 380kV-verbindingen doorgevoerd te worden, wat betekent dat extra elektrische aanlanding ingepast kan worden. Productie van overige bronnen, zoals hernieuwbare opwek op land en kernenergie, zorgt ervoor dat extra transport via 380kV-verbindingen nodig is en dat minder elektrische aanlanding ingepast kan worden.

Deze overige ontwikkelingen zijn vastgelegd in scenario's voor 2040, die gebruikt worden voor de beoordeling Systeemintegratie. De snelheid van deze ontwikkelingen in de aanlandregio's, met name de elektrificatie van de industrie en ontwikkeling van elektrolyzers, gedurende de periode 2031-2040 heeft een belangrijke impact op het mogelijke uitrolpad voor elektrische aanlandingen.

### **Ontwikkeling vraag en aanbod elektriciteit en waterstof in Nederland**

Naar verwachting zullen de jaren '30 beslissend zijn voor de richting van de ontwikkeling van het energiesysteem. Dit heeft impact op de gewenste verhouding tussen elektrische aanlanding en waterstofaanlanding. Met name rondom het gebruik van elektriciteit en waterstof, de ontwikkeling van flexibiliteit, toepassing van kernenergie en de omvang van de industrie.

In elk van de scenario's voor 2040 wordt een forse toename van de elektriciteitsvraag en flexibiliteit aangenomen. Het is belangrijk dat de uitrol van elektrische aanlanding in de pas loopt met de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag.

In de huidige routekaart windenergie op zee 21 GW worden alleen elektrische aanlandingen gerealiseerd. Door de eisen van de REDIII<sup>67</sup> voor vergroening van de bestaande waterstofvraag zal er naar verwachting in 2030 een forse groene waterstofvraag zijn. Tot begin jaren '30 moet dit vooral ingevuld worden met elektrolyse op land en zal naar verwachting ook waterstofimport nodig zijn. Later kan dit mogelijk ook ingevuld worden met offshore elektrolyse (als dit technisch haalbaar is), maar concurreert offshore elektrolyse wel met import van groene waterstof en met onshore elektrolyse. De snelheid van de uitrol van waterstofverbindingen in de jaren '30 is afhankelijk van de ontwikkeling van de waterstofvraag in dit decennium. Daarnaast is de ontwikkeling van waterstof gekoppeld aan de ontwikkelingen van de vraag naar elektriciteit, doordat waterstof een systeemrol heeft in het toekomstige energiesysteem en ook bijdraagt aan het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit.

### **Tijdige realisatie energie-infrastructuur tot aan aansluitlocatie**

Naast de energie-infrastructuur op land moet ook een forse hoeveelheid energie-infrastructuur gerealiseerd worden voor de aanlandingen. Vanwege de doorlooptijd van programma's en projecten (procedures en realisatie) van netten op zee, en de doorloop van de routekaart windenergie op zee 21 GW tot 2032, is het de verwachting dat vanaf medio jaren 30 de eerste elektrische aanlandingen vanuit pVAWOZ worden gerealiseerd.

Daarnaast is de maximale uitrolsnelheid van elektrische aanlandingen, naar verwachting 2 tot 4 GW per jaar, een beperkende factor. Voor realisatie van maximaal 50 GW wind op zee in 2040 (uitgangspunt onderzoek) is het naar verwachting noodzakelijk om de elektrische aanlandingen met

---

<sup>67</sup> [Renewable Energy Directive III](#). Deze stelt dat in 2030 42% van de industriële waterstofvraag ingevuld moet worden met groene waterstof.

maximale snelheid uit te rollen. Dit kan een extra groot knelpunt worden als het in de eerste helft van de jaren '30 niet mogelijk is om elektrische aanlandingen uit te rollen, doordat procedures en realisatie de nodige tijd vragen, de uitrol van routekaart windenergie op zee 21 GW verder getemporeerd wordt, de vraagontwikkeling achterblijft of aanpassingen aan het hoogspanningsnet op land niet op tijd gereed zijn.

Daarnaast zijn er nog enkele elektrische aanlandingen die complex zijn, en waarbij het onzeker is of deze op tijd gerealiseerd kunnen worden. Dit geldt voor diepe aanlandingen (in bijvoorbeeld Limburg), die onzeker zijn door het besluit om elektrische aanlandingen niet meer op te nemen in de projectprocedure van de Delta Rhine Corridor. Er is verder onderzoek nodig om te bepalen of en waar diepe aanlanding mogelijk is en op welke termijn. Hiervoor is een voorverkenning diepe aanlandingen gestart. Daarnaast zijn de elektrische aanlandingen richting de Eemshaven, die onderzocht zijn PAWOZ-Eemshaven, erg complex.

### **Tijdige realisatie energie-infrastructuur op land**

Tijdige realisatie van de geplande uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur op land is cruciaal voor de inpassing van extra elektrische aanlanding na 2031. Het kan gaan om uitbreidingen bij bestaande of aanleg van nieuwe stations om de elektrische aanlandingen aan te sluiten en/of uitbreidingen bij de 380kV-verbindingen die nodig zijn om elektriciteit af te voeren.

Bij een deel van de aansluitlocaties zijn uitbreidingen van de hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk waarvan realisatie eind jaren '20 of in de jaren '30 voorzien wordt. Uitloop van deze projecten kan ertoe leiden dat op die locaties elektrische aanlanding niet tijdig mogelijk is.

Hieronder volgt een tabel met, per regio, de uitbreidingen van de elektriciteitsinfrastructuur die nodig zijn om elektrische aanlanding mogelijk te maken. Hierbij geven we ook de geplande ingebruikname (IBN) volgens het investeringsplan voor het Net op Land van TenneT (TenneT, 2024)<sup>68</sup>. Na de realisatie van de benodigde elektriciteitsinfrastructuur op land (zoals een station) is nog circa één jaar nodig om een elektrische aanlanding hierop aan te sluiten.

---

<sup>68</sup> De geplande ingebruikname (IBN) data zijn (grotendeels) gebaseerd op het investeringsplan uit 2024 van TenneT. Mogelijk zijn de IBN-data voor een deel van de uitbreidingen sindsdien geüpdatet. In 2026 brengt TenneT een nieuw investeringsplan uit, met nieuwe IBN data.

Bij de geplande netuitbreidingen op land maken we onderscheid tussen de volgende vormen van uitbreidingen:

- 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.
- Verzwaring. De geleiders van bestaande verbindingen worden opgewaarderd naar 4kA-geleiders, waardoor deze meer elektriciteit kunnen transporteren. Deze maatregel heeft geen significante ruimtelijke consequenties, maar wel financiële consequenties.

Tabel 13-1 Benodigde uitbreidingen van de elektriciteitsinfrastructuur IP 2024 TenneT<sup>69</sup>

Regio	Geplande uitbreiding	Geplande IBN
Kop van Noord-Holland	Nieuw 380kV-station Noord-Holland Noord (NNHNn)	Na 2033
	Nieuwe 380kV-verbinding Noord-Holland Noord	Na 2033
Noord-Holland Zuid	Nieuw 380kV-station A9 Zuid	2029-2031
	Nieuw 380kV-station Netuitbreiding Noord-Holland Noord-Zuid (NNHNz)	Na 2033
	Verzwaring 380kV-verbindingen Beverwijk – Vijfhuizen - Bleiswijk, Krimpen aan den IJssel – Bleiswijk, Bleiswijk – Diemen, Diemen – Oostzaan, Oostzaan - Beverwijk	Tot 2033
	Versterken transportcapaciteit Beverwijk – Maasvlakte (Netuitbreiding 380kV Randstad) <sup>70</sup>	Na 2033
Zuid-Holland	Nieuw 380kV-station Europoort	2032
	Versterken transportcapaciteit Beverwijk – Maasvlakte (Netuitbreiding 380kV Randstad)	Na 2033
Zeeland	Nieuw 380kV-station Haven Vlissingen	2029
	Verzwaring 380kV-verbinding Borssele-Rilland	2029-2031
	Verzwaring 380kV-verbinding Rilland-Geertruidenberg	2031-2033
	Nieuwe 380kV-verbinding Rilland-Tilburg (Zuid-West 380kV Oost)	2030-2032
	Nieuw 380kV-station Terneuzen en nieuwe 380kV-verbinding Borssele-Terneuzen	Na 2033
Noord-Brabant en Limburg	Nieuw 380kV-station Moerdijk	2031-2033
	Nieuw 380kV-station Tilburg	2027
	Nieuwe 380kV-station Graetheide en nieuwe 380kV-verbinding Maasbracht – Graetheide	2030-2032
	Verzwaring 380kV-verbindingen Eindhoven-Geertruidenberg, Geertruidenberg-Krimpen aan den IJssel, Eindhoven	Tot 2033
Noord-Nederland	Verzwaring 380kV-verbinding Maasbracht Graetheide	Na 2033
	Verzwaring 380kV-verbinding Eemshaven Oude Schip - Vierverlaten	2023
	Nieuwe 380kV-verbinding Vierverlaten – Ens	2030

<sup>69</sup> De geplande ingebruikname (IBN) data zijn (grotendeels) gebaseerd op het investeringsplan uit 2024 van TenneT. Mogelijk zijn de IBN-data voor een deel van de uitbreidingen sindsdien geüpdatet. In 2026 brengt TenneT een nieuw investeringsplan uit, met nieuwe IBN data.

<sup>70</sup> Deze uitbreiding is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijdige) realisatie van de verbinding nog onzeker.

Regio	Geplande uitbreiding	Geplande IBN
	3 <sup>e</sup> en 4 <sup>e</sup> circuit Vierverlaten-Ens	Na 2033
	3 <sup>e</sup> en 4 <sup>e</sup> circuit Ens-Lelystad-Diemen	2033-2035
	3 <sup>e</sup> circuit Eemshaven – Eemshaven Oudeschip	2029-2031
	Station Oostpolder	2032-2034

In het algemeen valt te zien dat er in elke regio nog geplande uitbreidingen gerealiseerd moeten worden in de eerste helft van de jaren '30 (en soms ook nog daarna). En in sommige gevallen is de geplande ingebruikname ook nog onzeker. Dit betekent dat de tijdige realisatie van de hoogspanningsinfrastructuur op land een bottleneck kan zijn voor de uitrolsnelheid van de elektrische aanlandingen.

Hieronder is aangegeven welke aanlandingen, vanuit de beschikbaarheid van infrastructuur op land, het meest kansrijk zijn (bedoeld als het eerst gerealiseerd kunnen worden). Hierbij is aangegeven wat hiervoor nodig is<sup>71</sup>. Deze inschatting is gebaseerd op de geplande IBN van de netuitbreidingen op land, waarbij op basis van expert-judgement een inschatting is gemaakt welke netuitbreidingen randvoorwaardelijk zijn voor de inpassing van wind op zee. Dit betekent dat het een globale inschatting is, en dat het niet mogelijk is om exact aan te geven wat wel en niet mogelijk is. Echter, een exact beeld is op dit moment niet te geven omdat dit afhankelijk is van bijvoorbeeld de (snelheid van) de vraagontwikkeling. Het is daarom van belang dat TenneT dit in de toekomst blijft evalueren.

Tabel 13-2 Inschatting meest kansrijke elektrische aanlandingen

Regio	Meest kansrijke aanlandingen (vanuit beschikbare energie-infrastructuur op land)	Wat is hiervoor nodig?
Kop van Noord-Holland	Alleen bij realisatie NNHN	Netuitbreiding Noord-Holland Noord (NNHN) Netuitbreiding 380kV Randstad (Beverwijk – Maasvlakte) voor meer dan één aansluiting
Noord-Holland Zuid Zuid-Holland	Mogelijk één aansluiting (in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland).	Netuitbreiding 380kV Randstad (Beverwijk – Maasvlakte) voor meer dan één aansluiting
Zeeland	Mogelijk wel bij Sloegebied, Terneuzen onzeker	Realisatie van (één van) nieuwe stations voor aansluitcapaciteit 380kV naar Terneuzen (voor aanlanding in Terneuzen)
Noord-Nederland	Mogelijk bij Station Oostpolder	Aansluitcapaciteit bij Station Oostpolder Mogelijk meer afvoercapaciteit richting rest van Nederland
Noord-Brabant en Limburg	Mogelijk bij Moerdijk	Realisatie station Moerdijk voor aansluitcapaciteit

#### Kop van Noord-Holland

In de regio Kop van Noord-Holland is realisatie van project Netuitbreiding Noord-Holland Noord (NNHN), met zowel de 380kV-verbinding als een 380kV-station in de Kop van Noord-Holland, randvoorwaardelijk voor het mogelijk maken van elektrische aanlanding. De geplande

<sup>71</sup> Hierbij kijken we alleen naar beperkingen door tijdige realisatie van energie-infrastructuur op land. Er zijn nog andere beperkingen voor realisatie van elektrische aanlandingen in de eerste helft van de jaren '30, zoals de ontwikkeling van (flexibele) elektriciteitsvraag en tijdige realisatie van energie-infrastructuur op zee. Dit bespreken we in voorgaande paragrafen.

ingebruikname (IBN) is na 2033, maar een exacte datum is nog niet bekend. Na realisatie van dit station is nog een jaar nodig om elektrische aanlandingen aan te sluiten.

Daarnaast is, voor meer dan één aanlanding, transportcapaciteit vanaf Noord-Holland Zuid richting de rest van Nederland nodig, waarvoor de Netuitbreiding Randstad van belang is. Voor realisatie van deze netuitbreiding kan naar verwachting één elektrische aanlanding in de kop van Noord-Holland gerealiseerd worden zonder grote ingrepen (wel alleen bij realisatie van Netuitbreiding Noord-Holland Noord). Deze uitbreiding is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijds) realisatie van de verbinding nog erg onzeker. De geplande ingebruikname is na 2033.

#### *Noord-Holland Zuid*

In Noord-Holland Zuid is aansluitcapaciteit noodzakelijk op een 380kV-station. Dit is mogelijk bij het nieuwe station A9-Zuid, met een geplande ingebruikname in 2029-2031, en bij het nieuwe station NNHNz, met een geplande ingebruikname na 2033. Het is naar verwachting ook mogelijk om een elektrische aanlanding aan te sluiten bij het bestaande stations Vijfhuizen. Dan is wel een uitbreiding van het station nodig. Het is onbekend hoe lang dit zal duren, maar de verwachting is dat dit wel mogelijk is om dit uiterlijk in de eerste helft van de jaren '30 te realiseren. Daarnaast kan met een uitbreiding binnen het station een elektrische aanlanding gerealiseerd worden bij station Velsen (alleen 700 MW). Voor de elektrische aanlanding bij Velsen is het ook noodzakelijk dat de bestaande Vattenfall-centrales uit bedrijf zijn en aansluitvelden beschikbaar komen. Dit is afhankelijk van de verduurzaming van Tata Steel.

Er zijn verschillende projecten voor verzwaringen van 380kV-verbindingen die de transportcapaciteit binnen de regio en tussen de regio en de rest van Nederland versterken. Deze verzwaringen hebben een uiterlijke geplande ingebruikname van 2033 (sommige projecten al eerder). Met name de Netuitbreiding Randstad is naar verwachting belangrijk voor het mogelijk maken van elektrische aanlanding van wind op zee in Noord-Holland Zuid. Zonder deze uitbreiding is elektrische aanlanding in de Randstad uitdagend en lijkt slechts één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland mogelijk (plus één mogelijke aanlanding in de kop van Noord-Holland). Deze uitbreiding is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijds) realisatie van de verbinding nog onzeker. De geplande ingebruikname is na 2033.

#### *Zuid-Holland*

In Zuid-Holland is aansluitcapaciteit noodzakelijk op een 380kV-station. Dit is mogelijk bij het nieuwe station Europoort, met een geplande ingebruikname in 2030-2032. Het is naar verwachting ook mogelijk om een elektrische aanlanding aan te sluiten bij de bestaande stations Bleiswijk, Wateringen en Simonshaven. Dan is wel een uitbreiding binnen het station nodig. De verwachting is dat het mogelijk is om dit uiterlijk in de eerste helft van de jaren '30 te realiseren.

Met name de Netuitbreiding Randstad is naar verwachting belangrijk voor het mogelijk maken van elektrische aanlanding van wind op zee in Noord-Holland Zuid. Zonder deze uitbreiding is elektrische aanlanding in de Randstad uitdagend en lijkt slechts één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland mogelijk. Deze uitbreiding is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijds) realisatie van de verbinding nog erg onzeker. De geplande ingebruikname is na 2033.

### *Zeeland*

In Zeeland zijn twee aansluitlocaties die onderzocht worden: het Sloegebied en Terneuzen. Een elektrische aanlanding in Terneuzen is pas mogelijk als hier een 380kV-station geplaatst is en een 380kV-verbinding tussen het Sloegebied en Terneuzen gerealiseerd is. De geplande ingebruikname hiervoor ligt na 2033. Na realisatie van dit station is nog een jaar nodig om elektrische aanlandingen aan te sluiten.

Mogelijk is het, vanuit beschikbaarheid van de hoogspanningsinfrastructuur op land gezien, wel eerder haalbaar om een elektrische aanlanding te realiseren in het Sloegebied. De transportcapaciteit tussen Zeeland en Noord-Brabant wordt vergroot met verschillende uitbreidingen, waarvan de laatste een ingebruikname heeft van 2033. En ook het nieuwe station in het Sloegebied, wat noodzakelijk is voor het aansluiten van een elektrische aanlanding, is daarvoor klaar. Dat betekent dat, vanuit beschikbaarheid van de hoogspanningsinfrastructuur op land gezien en met de huidige verwachtingen voor realisatie van de hoogspanningsinfrastructuur, vanaf 2033 aanlanding in het Sloegebied mogelijk lijkt.

### *Noord-Brabant en Limburg*

In Noord-Brabant en Limburg is voor sommige van de potentiële aansluitlocaties nog een nieuw station (en bij Graetheide ook opwaardering 380kV-verbinding richting het station) nodig. Voor Tilburg is de verwachte ingebruikname 2027, voor Moerdijk 2031-2033 en voor Graetheide 2030-2032. Dit betekent dat het op deze locaties, vanuit beschikbaarheid van de hoogspanningsinfrastructuur op land gezien, naar verwachting mogelijk is om een elektrische aanlanding aan te sluiten in de eerste helft van de jaren '30.

Het is naar verwachting niet mogelijk om een elektrische aanlanding aan te sluiten bij het bestaande station Maasbracht. Om dit mogelijk te maken zou een nieuw station nodig zijn. Daar zijn nu nog geen plannen voor, en is daarmee naar verwachting niet haalbaar in de eerste helft van de jaren '30.

Daarnaast zijn er verschillende verzwaringen aan 380kV-verbindingen in de regio gepland, die grotendeels voor 2033 gepland zijn. Het is daarom de verwachting dat er, vanuit de geplande uitbreidingen en beschikbare aansluit- en transportcapaciteit van het hoogspanningsnet op land, geen onoverkomelijke belemmeringen zijn voor het realiseren van een elektrische aanlanding in de eerste helft van de jaren '30.

De grootste beperking qua tijd voor aanlanding in Tilburg en Limburg zal naar verwachting liggen bij het realiseren van de diepe aanlanding zelf. Vanwege het recente besluit om elektrische verbindingen niet mee te nemen in de procedures voor de Delta Rhine Corridor is het niet meer mogelijk om diepe aanlanding in de eerste helft van de jaren '30 te realiseren. Realisatie van aanlanding in Moerdijk kan, vanuit beschikbaarheid van de hoogspanningsinfrastructuur op land gezien, mogelijk wel gerealiseerd worden in de eerste helft van de jaren '30.

### *Noord-Nederland*

Voor elektrische aanlanding in Noord-Nederland is een aansluiting bij het nieuwe 380kV-station Oostpolder noodzakelijk. De geplande ingebruikname voor dit station is 2032-2034. Na realisatie van dit station is nog een jaar nodig om elektrische aanlandingen aan te sluiten.

Daarnaast zijn er verschillende uitbreidingen aan de 380kV-verbindingen gepland, voor het vergroten van de transportcapaciteit richting de rest van Nederland. Tot 2031 wordt reeds de 220kV-verbinding Viervelaten-Ens opgewaardeerd naar 380kV en wordt een derde circuit geplaatst tussen Eemshaven en Eemshaven Oudeschip. De transportcapaciteit van Noord-Nederland richting de rest van Nederland wordt verder vergroot met een 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> circuit tussen Viervelaten en Ens, en op het tracé Ens-Lelystad-Diemen. De geplande ingebruikname van deze uitbreidingen ligt na 2033.

### *Waterstofaanlanding*

Voor waterstofaanlandingen is realisatie van het Waterstofnetwerk Nederland, de regionale waterstofinfrastructuur en de Delta Rhine Corridor (DRC) van belang. De Delta Rhine Corridor is gepland voor 2031-2033. Bij het Waterstofnetwerk Nederland zijn er nog enkele uitbreidingen die na 2033 gerealiseerd moeten worden. Dit gaat onder meer om het tracé Den Helder-Beverwijk, wat nodig is voor waterstofaanlanding in de Kop van Noord-Holland. Er is nog geen geplande realisatiedatum voor dit tracé. Voor waterstofaanlanding in Grijpskerk is een deel van de IJsselmeerroute nodig (vanaf waterstofnetwerk Noord-Nederland). Hiervoor kan waarschijnlijk een bestaande leiding gebruikt worden, waarvan realisatie in de eerste helft van de jaren '30 haalbaar lijkt.

### **Conclusies**

Op basis van bovenstaande aspecten kunnen we de volgende conclusies trekken wat betreft de elektrische aanlandingen vanuit systeemintegratie en benodigde ontwikkelingen van infrastructuur:

- In bepaalde regio's lijkt de hoogspanningsinfrastructuur op land niet op tijd klaar voor elektrische aanlanding medio jaren '30, in andere regio's mogelijk wel. In Zeeland, Noord-Nederland, Moerdijk, één aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland is de benodigde infrastructuur op land met de huidige verwachting voor medio jaren '30 klaar.
- Vraagontwikkeling (inclusief flexibele vraag van bijvoorbeeld elektrolyzers) is cruciaal voor de realisatie van elektrische aanlandingen. Op dit moment blijft de elektrificatie (van met name de industrie) en de ontwikkeling van elektrolyzers nog achter. Als dat niet tijdig bijtrekt, dan worden de waardes in de scenario's voor 2040 niet gehaald. Dan is het naar verwachting uitdagend om veel extra elektrische aanlandingen (bovenop de bestaande routekaart) in te passen.

De belangrijkste conclusies voor de waterstofaanlandingen zijn:

- De grootste onzekerheid bij de waterstofaanlandingen lijkt de tijdige beschikbaarheid van de techniek te zijn, aangezien op dit moment nog geen offshore elektrolyse op grote schaal toegepast wordt. Demonstratieprojecten voor waterstofproductie op zee kunnen hier uitsluitsel over geven.
- Daarnaast is een onzekerheid of er wel (tijdig) voldoende vraag naar groene waterstof in Nederland ontstaat. De eisen voor gebruik van groene waterstof vanuit de REDIII zorgen ervoor dat een aanzienlijk deel van de huidige grijze waterstof vervangen moet worden met groene waterstof, en leidt daarmee tot vraag naar groene waterstof. Maar hiervoor concurreert offshore elektrolyse met import en elektrolyse op land.
- Tot slot moeten voor waterstofaanlanding bij de Kop van Noord-Holland nog waterstofleidingen op land gerealiseerd worden die na 2033 pas gereed zijn en waar nu nog geen geplande realisatiedatum voor is. Voor waterstofaanlanding in Grijpskerk kan waarschijnlijk een bestaande leiding gebruikt worden. De realisatie hiervan lijkt in de eerste helft van de jaren '30 haalbaar.

### 13.1.2 Doorkijk richting 2050

Voor de afweging rondom aanlanding van wind op zee in pVAWOZ is een doorkijk naar een klimaatneutraal eindbeeld in 2050 noodzakelijk. Het is namelijk belangrijk dat de ontwikkelingen van wind op zee in pVAWOZ in lijn liggen met het eindbeeld in 2050 en dat geen keuzes gemaakt worden die vanuit het langere termijn perspectief niet efficiënt blijken te zijn. De twee hoofdvragen bij toekomstvastheid zijn:

- Zijn aanlandingen die gerealiseerd worden in pVAWOZ nog steeds nodig in 2050 en dus toekomstvast?
- Zijn andere keuzes wenselijk, als terugkijkend vanaf het eindbeeld in 2050?

#### Toekomstvastheid

Om een inschatting te maken van de toekomstvastheid richting 2050 is het belangrijk om te kijken naar de verwachte ontwikkelingen tussen 2040 en 2050. Voor de integratie van wind op zee in het systeem zijn met name de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag, de waterstofvraag en productie van overige energiebronnen (met name wind op land en kernenergie) relevant. Zowel binnen regio's als voor heel Nederland.

De onderstaande tabel toont de verwachte ontwikkelingen van vraag en aanbod van elektriciteit en waterstof tussen 2040 en 2050 in Nederland. Hierbij geven we de bandbreedte van de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, aangezien deze scenario's gehanteerd worden voor de analyses voor Systeemintegratie. Onder de tabel bespreken we de consequenties van de ontwikkelingen tussen 2040 en 2050 op de toekomstvastheid van elektrische aanlandingen en waterstofaanlandingen.

Tabel 13-3 Verwachte ontwikkeling vraag energie en aanbod overige productiebronnen

	2040	2050
<b>Energievraag</b>		
<b>Elektriciteitsvraag, inclusief flexibele vraag (van bijvoorbeeld elektrolyse)</b>	259 – 327 TWh	339 – 433 TWh
<b>Waterstofvraag</b>	78 – 92 TWh	114 – 159 TWh
<b>Productie overige bronnen</b>		
<b>Zon-PV</b>	93 – 123 GW	126 – 172 GW
<b>Wind op land</b>	9 – 15 GW	10 – 20 GW
<b>Kernenergie</b>	1,5 – 4 GW <sup>72</sup>	3 – 8 GW

#### Elektriciteit

De elektriciteitsvraag neemt naar verwachting toe tussen 2040 en 2050. Dit komt doordat in 2040 nog een deel van de energievraag ingevuld wordt met fossiele brandstoffen. De productie van overige bronnen van elektriciteitsproductie (wind op land, zon, kernenergie) neemt echter ook toe. Maar het is de verwachting dat de hoeveelheid elektrische aanlanding in heel Nederland die voorzien wordt voor 2040, ook in 2050 nog nodig is. Mogelijk is na 2040 nog extra elektrische aanlanding nodig voor de invulling van de binnenlandse elektriciteitsvraag, afhankelijk van de ontwikkeling van vraag en overig aanbod.

<sup>72</sup> Dit zijn de cijfers van de basisscenario's. Er zijn voor 2040 ook gevoeligheidsscenario's gedaan met 3,7 GW (2 nieuwe grote kerncentrales) en 6,9 GW (4 nieuwe grote kerncentrales) kernenergie.

Daarnaast is het ook relevant om te kijken naar de ontwikkelingen per regio. Het is de verwachting dat de elektriciteitsvraag in elk van de regio's stijgt tussen 2040 en 2050, aangezien de totale elektriciteitsvraag en de elektriciteitsvraag van de industrie in Nederland in elk van de scenario's stijgt. Dit betekent dat de hoeveelheid elektrische aanlanding die per regio mogelijk is in 2040, in ook in 2050 mogelijk lijkt.

Dit geldt niet als er andere grootschalige productiebronnen gerealiseerd worden in de regio tussen 2040 en 2050. Dit geldt met name voor kernenergie. Keuzes voor elektrische aanlanding van wind op zee tot 2040 zouden ervoor kunnen zorgen dat er in regio's geen grote kerncentrales meer ingepast kunnen worden na 2040.

Richting 2050 kunnen mogelijk ook elektrische aanlandingen gerealiseerd worden die voor 2040 gunstig lijken, maar die niet tijdig gerealiseerd kunnen worden. Dit geldt bijvoorbeeld als de Randstad uitbreiding na 2040 gerealiseerd wordt. In dat geval kunnen in Noord- en Zuid-Holland na 2040 nog extra elektrische aanlandingen gerealiseerd worden. Ook voor diepe aanlanding is het onzeker of realisatie voor 2040 haalbaar is. Dit zal echter ook na 2040, vanuit het perspectief van systeemintegratie, gunstig blijven.

In Target Grid, de visie van TenneT op de ontwikkeling van het hoogspanningsnetwerk na de zichtperiode van hun investeringsplannen, heeft TenneT ook de ontwikkeling van een gedeeltelijk gelijkstroomnet in Nederland opgenomen. In de visie is ook een onshore DC-hub in Zeeland opgenomen. Dit zou extra aanlanding in Zeeland mogelijk maken als (een groot deel van) de elektriciteit direct doorgevoerd wordt naar België. Dit is echter nog geen concreet plan. Daarnaast benoemt TenneT dat Target Grid een dynamische strategie is, waar nog dingen in kunnen wijzigen.

### *Waterstof*

De waterstofvraag neemt tussen 2040 en 2050 naar verwachting ook toe, terwijl de waterstofproductie vanuit andere bronnen dan wind op zee (bijvoorbeeld blauwe waterstof) naar verwachting niet significant toeneemt. De rol van elektrolyse in Nederland zal daarom naar verwachting toenemen tussen 2040 en 2050, behalve als er veel meer import van groene waterstof komt. Dit betekent dat de hoeveelheid waterstofaanlanding die voor 2040 voorzien is minimaal ook voor 2050 toekomstvast is.

Bij waterstofaanlandingen zijn de meest gunstige aanlandingen richting 2040, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet persé ook toekomstvast richting 2050. Richting 2050 kan extra offshore elektrolyse worden aangesloten op de buisleidingen die tot 2040 gerealiseerd worden, wat leidt tot extra impact op het waterstofnetwerk op land. De benodigde maatregelen voor het waterstofnetwerk in 2040 zijn beperkt in vergelijking met die voor 2050. Er zijn meer additionele pijpleidingen en compressievermogen nodig. Daarnaast zijn de verschillen tussen configuraties in de 2050-analyse groter dan die in de analyse voor 2040. Dit betekent dat het verstandig is om de impact van de waterstofaanlandingen in 2050 mee te wegen bij de keuze voor 2040, en richting 2040 in te zetten op aanlandingen die ook in 2050 gunstig zijn.

Gasunie heeft doorrekeningen gedaan om de impact van waterstofaanlandingen in verschillende regio's in 2050 te bepalen. Er zijn door Gasunie analyses gedaan met 19 GW waterstofaanlanding<sup>73</sup> in 2050, waarbij aanlanding in de kop van Noord-Holland en Grijpskerk en een combinatie van deze

---

<sup>73</sup> Dit is de energiehoeveelheid van waterstof (dus niet elektriciteit). Het gaat om de calorische bovenwaarde.

twee locaties met elkaar vergeleken is. Uit die analyse volgt dat één waterstofaanlanding richting Grijskerk en één aanlandingen richting beide locaties een vergelijkbare impact hebben op het Waterstofnetwerk Nederland. Daar is dus geen duidelijke voorkeur, vanuit systeemintegratie gezien. Bij één waterstofaanlanding richting de kop van Noord-Holland zijn meer ingrepen nodig aan het WNL dan bij de andere twee opties (één aanlanding Grijskerk of combinatie van beiden).

Daarnaast is een analyse gedaan met een grotere hoeveelheid waterstofaanlanding van 36 GW (calorische bovenwaarde waterstof). Dit is dus meer dan vijfmaal zo hoog als de aanname voor 2040. In dat geval zijn bij een combinatie van twee aanlandlocaties in het algemeen minder ingrepen nodig dan bij aanlanden op één aanlanding. Een combinatie tussen een aanlanding in Noord-Holland (Kop van Noord-Holland of Noord-Holland Zuid) en Noord-Nederland (Eemshaven of Grijskerk) leidt in dat geval tot de minste ingrepen aan het Waterstofnetwerk Nederland.

Richting 2040 leidt een waterstofaanlanding richting de kop van Noord-Holland, Grijskerk of de Eemshaven tot de minste ingrepen en wordt die dus het best beoordeeld. Richting 2050 lijken in ieder geval de waterstofaanlandingen richting Noord-Nederland (Grijskerk of Eemshaven) toekomstvast. Een waterstofaanlanding in de kop van Noord-Holland lijkt richting 2050 alleen gunstig in combinatie met een aanlanding in Grijskerk of de Eemshaven.

Richting 2040 maakt het voor de impact op het waterstofnetwerk weinig uit of gekozen wordt voor één of twee aanlandlocaties. Richting 2050 is het nog onzeker of één of twee aanlandingen gunstiger is. Dit hangt af van de hoeveelheid offshore elektrolyse, maar ook van andere aspecten zoals de mogelijkheid voor hergebruik van buisleidingen op zee. Er kan richting 2040 gekozen worden om alvast op twee locaties te richten, zodat de aanlandingen direct toekomstvast zijn. Maar het is onzeker of dit in 2050 gunstig is. Daarom is het ook mogelijk om een aanlanding richting een tweede locatie pas na 2040 te realiseren, als er meer duidelijkheid is over nut en noodzaak van deze tweede aanlanding. In dat geval lijkt het verstandig om in te zetten op aanlanding bij Grijskerk (of eventueel Eemshaven), aangezien dit tot de minste ingrepen aan het Waterstofnetwerk Nederland leidt bij een enkele waterstofaanlanding in 2050.

### **Terugkijken vanaf 2050**

Windenergie op zee dient als motor voor de energietransitie. De Rijksoverheid heeft de ambitie uitgesproken voorbereid te willen zijn op de realisatie van 70 GW aan windparken op zee in 2050. In 2050 is naar verwachting 38 GW elektrische aanlanding noodzakelijk voor de invulling van de binnenlandse finale elektriciteitsvraag<sup>74</sup>, en bij grootschalige uitrol van kernenergie of krimp van de industrie naar verwachting minder. Een deel kan op zee worden omgezet in waterstof om die markt te bedienen. De grote vraag is waar de overige energie van de windparken op zee voor gebruikt gaat worden. Het is bijvoorbeeld een mogelijkheid om hier extra waterstof van te maken, voor export naar landen met een vraag naar duurzame energie. Maar het is ook mogelijk om een deel van deze energie te gebruiken voor de invulling van de elektriciteitsvraag in onze buurlanden en om daarmee verduurzaming in die landen te stimuleren.

Een efficiënt energiesysteem in 2050 vraagt al eerder om strategische keuzes. Denk hierbij aan energie onafhankelijkheid, produceren voor buurlanden en de energiemix. pVAWOZ is een

---

<sup>74</sup> Dit volgt uit analyses van Target Grid, waarbij het scenario Nationaal Leiderschap met de grootste elektriciteitsvraag onderzocht is.

onderdeel in deze keuzes, maar moet in relatie gezien worden met andere Rijksprogramma's rondom energie.

## Referenties

- Guidehouse, & Berenschot. (2021). *Systeemintegratie wind op zee 2030-2040*.
- Kalavasta. (2023). *Onderzoek vraagarticulatie industrie voor vawoz en programma kernenergie*.
- Netbeheer Nederland. (2023). *Het energiesysteem van de toekomst: De ii3050-scenario's*.
- NSWPH. (2024). *Pathway study 2.0*.
- Onderzoek vraagarticulatie industrie voor vawoz en programma kernenergie*. (2023).
- Pondera Consult, & CE Delft. (2023). *Integrale effectenanalyse programma energiehoofdstructuur*.
- TenneT. (2023). *Target grid, het elektriciteitsnet van de duurzame toekomst begint vandaag*.
- TenneT. (2024). *Investeringsplan net op land 2024-2033*.

# Bijlage A. Plan van aanpak integrale netdoorrekeningen TenneT en Gasunie

## A.1 Algemene uitgangspunten doorrekeningen

- We rekenen de situatie in 2040 door. In de doorrekeningen wordt aangenomen dat alle geplande uitbreidingen aan de energie-infrastructuur (bv uit investeringsplannen) dan gerealiseerd zijn.
- We sluiten bij de doorrekeningen aan op de scenario's uit de Startanalyse Systeemintegratie, die gebaseerd zijn op de ii3050 scenario's.
- We gaan in de scenario's die doorgerekend worden uit van 50 GW wind op zee in 2040 en een verhouding 10 elektrische aanlandingen en maximaal 2 waterstofaanlandingen. Daarnaast wordt één gevoeligheidsanalyse met 15 elektrische verbindingen (en geen waterstofaanlandingen) doorgerekend.
- We variëren de verhouding tussen elektrische aanlandingen en waterstofaanlandingen verder niet. Dit heeft als consequentie dat doorgerekende scenario's mogelijk 'uit balans zijn' en grote overschotten van elektriciteit hebben.
- In de doorrekeningen gaan we uit van radiale verbindingen (aansluiten windpark op óf elektrische verbinding of waterstofverbinding, geen hybride verbindingen).

## A.2 Scenario's en configuraties

Er worden meerdere scenario's doorgerekend om een goede inschatting te kunnen maken van de onzekerheden en de impact van verschillende configuraties van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. We zien hierbij twee relevante assen:

- **Energetisch scenario.** De ontwikkeling van de energievraag en overige productiebronnen is van belang voor de impact van wind op zee op de energie-infrastructuur op land en hoe deze ontwikkelingen gaan lopen is nog onzeker.
- **Configuraties locaties aanlanding wind op zee.** Zoals eerder benoemd gaan de doorrekeningen uit van 10 elektrische aanlandingen en maximaal 2 waterstofaanlandingen. Maar de locaties van deze aanlandingen zijn bepalend voor de impact op de energie-infrastructuur op land.

## Energetische scenario's

- Er worden twee scenario's doorgerekend. Het gaat om de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie van ii3050. Het scenario Nationaal Leiderschap heeft veel elektrificatie, waardoor een relatief groot deel van de geproduceerde elektriciteit van windparken op zee direct benut kan worden. Het scenario Europese Integratie heeft relatief weinig elektrificatie en veel productie van kerncentrales, en meer waterstofvraag en interconnectiecapaciteit.
- Bij de doorrekeningen voor elektriciteit en waterstof worden dezelfde aannames gehanteerd, zodat er een goed totaalbeeld ontstaat van de impact van wind op zee op het energiesysteem.

- Bij het scenario Europese Integratie moet, ten opzichte van het oorspronkelijke ii3050 scenario, extra wind op zee toegevoegd om aan de 50 GW te komen. Dit heeft implicaties op de rest van het energiesysteem (bv op inzet flexibiliteit en import/export).
- Voor de gevoeligheidsanalyse met 15 elektrische verbindingen moet ook een nieuw energetisch scenario opgesteld worden, waarin de energievraag en aanbod van overige bronnen gelijk is gehouden, maar voor de inzet van flexibiliteit (zoals elektrolyse op land, import/export elektriciteit, opslag) is een nieuwe inschatting gemaakt. Deze gevoeligheidsanalyse is uitgewerkt voor het (basis-)scenario Nationaal Leiderschap.

## Configuraties

Er zijn voor elektrische aanlanding verschillende configuraties voor de (ruimtelijke) verdeling van de aanlandingen denkbaar. Het doel van de doorrekening is om de impact van verschillende configuraties te bepalen, zodat deze tegen elkaar afgewogen kunnen worden. Idealiter worden alle mogelijke configuraties doorgerekend, maar vanuit praktisch oogpunt is het wenselijk om dit af te kaderen. Hieronder volgt een omschrijving van de configuraties die doorgerekend worden.

## Elektriciteit

### Doelen samenstelling configuraties

De onderstaande configuraties geven een bandbreedte van de mogelijke ontwikkelingen weer. Het doel is niet om de optimale configuratie te zoeken, maar om zoveel mogelijk informatie te vergaren over de impact van verschillende configuraties op de hoogspanningsinfrastructuur. De, vanuit integraal perspectief, optimale configuratie zal mogelijk ergens in het midden liggen. Het is wel zaak dat het realistische configuraties zijn. Bestaande inzichten over wat, vanuit systeemintegratie, mogelijk en wenselijk is zijn meegenomen maar er zijn ook configuraties meegenomen die vanuit systeemintegratie niet optimaal zijn (maar wellicht wel vanuit ruimtelijk oogpunt), aangezien systeemintegratie niet de enige relevante factor is.

### Algemene doelen

- Per aanlandingslocatie inzicht krijgen wat de effecten zijn van verschillende hoeveelheden aanlanding en wat maximaal inpasbaar is. Per locatie moet in verschillende configuraties een range van realistische vermogens meegenomen worden.
- Impact energetische scenario's, zoals ontwikkeling kernenergie, flexibele vraag, interconnectiecapaciteit, moet hierin ook duidelijk zijn.
- Impact van verschillende (globale) verdelingen over het land (gespreid of geclusterd, alleen aan kust of ook dieper landinwaarts) op het volledige net.
- Inzicht geven wat mogelijkheden zijn als bepaalde aansluitlocaties (de Kop van Noord-Holland, Eemshaven, DRC) niet mogelijk blijken te zijn.
- Het doel is niet om een allesomvattend beeld te schetsen van het energiesysteem in 2040, maar om het thema systeemintegratie van wind op zee in het hoogspanningsnetwerk op land (relatief) te kunnen beoordelen in de effectenanalyse. In kort: in welke regio kan wind op zee ingevoerd worden met de minste uitdagingen, en in welke range van het aantal verbindingen?

### Doel per aanlandconfiguratie

- **Ruimtelijke optimalisatie:** Inzicht geven van effecten op hoogspanningsnet van ‘ruimtelijk optimale’ verdeling. Hierbij is een evenredige verdeling over de verschillende regio’s van aansluitlocaties aangenomen, rekening houdend met de tussentijdse inzichten uit het ruimtelijke spoor van VAWOZ. De overige configuraties zien we als uithoeken, maar deze configuratie als een inschatting van wat we verwachten dat, vanuit verschillende perspectieven, kansrijk kan zijn.
- **Energiecorridors:** Inzicht geven in effecten van geclusterde aanlanding op enkele locaties, verspreid over het land. Deels zijn de corridors ruimtelijk (op zee, maar ook over land, bijv. richting Limburg), maar ook zijn de aanlandpunten (nu, of mogelijk in de toekomst) elektrisch verbonden met andere landen. Deze configuratie past goed bij de verhaallijn van het Europese Integratie scenario.
- **Geen aanlanding Kop van NH:** Onderzoeken of het mogelijk is om 10 elektrische verbindingen van wind op zee aan te sluiten op land zonder aanlandingen in de Kop van Noord-Holland, waardoor twee 380kV-circuits richting deze regio een optie is. Bij de overige verbindingen is een vanuit systeemintegratie gunstige verdeling aangehouden, aangezien anders het ontzien van de Kop van Noord-Holland erg uitdagend is.
- **Geen diepe aanlanding:** Onderzoek of het mogelijk is om de aanlanding van wind op zee te realiseren zonder diepe aanlanding via de DRC. Bij de overige verbindingen is een vanuit systeemintegratie gunstige verdeling aangehouden, aangezien dit naar verwachting wel noodzakelijk is als de DRC niet mogelijk lijkt te zijn. In deze configuratie wordt maximaal ingezet op aanlanding in Noord-Holland (in totaal 8 GW).
- **Spreiding zonder Eemshaven:** In deze configuratie wordt uitgegaan van geen extra aanlanding in de Eemshaven na Ten Noorden van de Waddeneilanden en Doordewind 1. In plaats daarvan zal veel aanlanding plaatsvinden in Rotterdam, Zeeland en Moerdijk/Geertruidenberg.
- **15 elektrische verbindingen:** In dit scenario gaan we uit van 15 elektrische verbindingen en 50 GW elektrische aanlanding van wind op zee. We gaan uit van een vanuit systeemintegratie gunstige verdeling aangezien dit naar verwachting noodzakelijk is om 15 elektrische verbindingen te kunnen realiseren.

### Range per aanlandconfiguratie

Een van de belangrijkste doelen van de doorrekeningen is om inzicht te krijgen per regio van potentiële aansluitlocaties hoeveel elektrische verbindingen mogelijk zijn. Daarom is per regio een range meegenomen in de verschillende scenario’s. Hieronder volgt een toelichting van de range die we per regio meenemen:

- **Eemshaven.** Uit de analyses van fase A en eerdere onderzoeken is gebleken dat vanuit het perspectief van systeemintegratie naar verwachting maximaal 8 GW extra ingepast kan worden tussen 2031 en 2040, dus dat is aangenomen als bovengrens. Vanuit systeemintegratie is het naar verwachting wenselijk om zoveel mogelijk aan te landen bij de Eemshaven (tot 8 GW). Echter, ruimtelijk gezien zijn er grote uitdagingen. Daarom hebben we in de configuraties ook 0 GW, 2 GW, 4 GW en 6 GW meegenomen.
- **De Kop van Noord-Holland.** Hoeveel aanlanding mogelijk is in de Kop van NH is afhankelijk van de ontwikkeling van de 380kV-verbindingen tussen de Kop van NH en Noord-Holland Zuid. Er is een wisselwerking tussen de aanlanding bij de Kop van NH en Noord-Holland Zuid, aangezien de stroom van beide gebieden via dezelfde verbindingen richting de rest van Nederland afgevoerd wordt. Uit de analyses van fase A volgt dat, vanuit het perspectief van systeemintegratie, naar verwachting tot 8 GW in Noord-Holland ingepast kan worden. Dit

pakken we als bovengrens. Voor de kop van Noord-Holland onderzoeken we 0 GW, 2 GW, 4 GW en 6 GW.

- **Noord-Holland Zuid.** Zie toelichting bij Kop van NH. Er zijn, vanuit systeemintegratie, geen aanvullende beperkingen bij Noord-Holland Zuid. Ruimtelijk gezien is inpassing naar verwachting uitdagend, daarom onderzoeken we 0 GW, 2 GW en 4 GW.
- **Rotterdam.** Vanuit de routekaart landt reeds 7,4 GW aan bij Rotterdam. Uit de analyses van fase A en eerdere onderzoeken is gebleken dat tot 2040 naar verwachting maximaal 4 GW extra ingepast kan worden, vanuit het perspectief van systeemintegratie. Na 2040 kan, afhankelijk van de vraagontwikkeling in het havengebied, mogelijk nog wat meer aanlanden. Om een brede range mee te nemen onderzoeken we extra aanlanding van 0 GW, 2 GW, 4 GW en 6 GW in Rotterdam.
  - Veel aanlanding in Rotterdam, Zeeland en Moerdijk/Geertruidenberg samen leidt mogelijk tot problemen op de 380kV verbindingen in Noord-Brabant en is daarom mogelijk, vanuit het perspectief van systeemintegratie, onwenselijk. Daarom kijken we naar configuraties met weinig gecombineerd vermogen en veel gecombineerd vermogen in deze regio's.
  - Hoeveel extra aanlanding mogelijk is in Rotterdam is mede afhankelijk van de mogelijke ontwikkeling van kernenergie. In het scenario Europese Integratie zit meer ontwikkeling van kernenergie. Om inzicht te krijgen in de wisselwerking tussen wind op zee en kernenergie onderzoeken we beide energetische scenario's.
- **Zeeland.** Uit de analyses van fase A en eerdere onderzoeken is gebleken dat tot 2040 naar verwachting maximaal 4 GW extra ingepast kan worden, vanuit het perspectief van systeemintegratie. Daarom onderzoeken we 0 GW, 2 GW en 4 GW extra in Zeeland.
  - Hoeveel extra aanlanding mogelijk is in Zeeland is mede afhankelijk van de mogelijke ontwikkeling van kernenergie. In het scenario Europese Integratie zit meer ontwikkeling van kernenergie. Om inzicht te krijgen in de wisselwerking tussen wind op zee en kernenergie onderzoeken we beide energetische scenario's.
- **Moerdijk/Geertruidenberg.** We onderzoeken de effecten van maximaal 4 GW aanlanding in Moerdijk en/of Geertruidenberg, aangezien we dit als de bovengrens zien. We kijken daarnaast naar de effecten bij 0 of 2 GW.
- **Tilburg.** Om de inzichten van aanlanding bij Tilburg inzichtelijk te maken onderzoeken we in één configuratie 2 GW aanlanding bij Tilburg.
- **Limburg.** Diepe aanlanding bij Limburg (Maasbracht of Chemelot) kan een mogelijk gunstige inzet hebben op het energiesysteem. Naar verwachting is ruimtelijk gezien maximaal 3 verbindingen/6 GW mogelijk, dus dat nemen we als bovengrens. We onderzoeken ook 4 GW en 0 GW aanlanding in Limburg. We nemen geen 2 GW doorrekening mee, aangezien we het niet aannemelijk achten dat diepe aanlanding gerealiseerd wordt voor slechts één verbinding.

### Doorgerekende configuraties

De onderstaande tabel geeft een voorzet voor de configuraties voor de ruimtelijke verdeling van de elektrische aanlandingen.

Tabel 0-1 Doorgerekende configuraties

Configuratie	Ruimtelijke optimalisatie	Energiecorridors	Geen aanlanding Kop van NH	Geen diepe aanlanding	Spreiding zonder Eemshaven	15 elektrische verbindingen

<b>Noord-Nederland</b>	2 GW	8 GW	6 GW	4 GW	0 GW	8 GW
<b>Kop van Noord-Holland</b>	4 GW	6 GW	0 GW	4 GW	2 GW	4 GW
<b>Noord-Holland Zuid</b>	2 GW	0 GW	4 GW	4 GW	2 GW	2 GW
<b>Zuid-Holland</b>	2 GW	0 GW	2 GW	4 GW	6 GW	4 GW
<b>Zeeland</b>	2 GW	0 GW	0 GW	2 GW	4 GW	4 GW
<b>Moerdijk/G'berg</b>	4 GW	0 GW	2 GW	2 GW	2 GW	2 GW
<b>Tilburg</b>	0 GW	0 GW	2 GW	0 GW	0 GW	0 GW
<b>Limburg</b>	4 GW	6 GW	4 GW	0 GW	6 GW	4 GW

## Waterstof

Voor waterstofaanlanding is de situatie minder complex, vooral omdat er maar maximaal 2 waterstofaanlandingen gerealiseerd worden. Er wordt in de doorrekening uitgegaan van een enkele buisleiding voor aanlanding van waterstof vanuit zee van 7 GW waterstof. Deze situatie wordt voor elk van de zes potentiële locaties doorgerekend. Bij een verdeling van de aanlanding van waterstof over twee verschillende regio's is de impact op het Waterstofnetwerk Nederland kleiner. De resultaten laten zien dat deze 'worst case' aanpak voldoende inzichten biedt.

Voor de waterstofinfrastructuur is ook de elektrische aanlanding relevant, aangezien die impact heeft op de elektrolysecapaciteit. De elektrolysecapaciteit per locatie verschilt per energetisch scenario en de hoeveelheid elektrische aanlanding (bij de verschillende configuraties). Het is vanuit praktisch perspectief niet mogelijk om alle mogelijke combinaties tussen waterstofaanlandingen en elektrolysecapaciteit op land door te rekenen. We rekenen daarom elke aanlandingslocatie voor waterstof door in combinatie met de elektrische configuratie waarin op deze aanlandingslocatie het meeste elektrolysevermogen op land staat. Dit zijn 6 cases (één per aanlandingslocatie). Elke andere combinatie wordt niet doorgerekend. De resultaten laten zien dat deze 'worst case' aanpak voldoende inzichten biedt.

## Bijlage B. Verschillen- en gevoeligheidsanalyses

# Verschillen- en gevoeligheidsanalyses

Bijlage beoordeling Systemintegratie Programma  
VAWOZ



Datum: 27-06-2025  
Versienummer: 5.1  
Status: Definitief

In opdracht van:



Ministerie van Klimaat en  
Groene Groei

# INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding.....	3
1.1	Aanleiding.....	3
1.2	Welke verschillen- en gevoeligheidsanalyses worden uitgewerkt, en hoe? .....	4
1.3	Leeswijzer .....	5
2	Flexibiliteit en elektrolyse .....	6
2.1	Samenvatting .....	6
2.2	Introductie flexibiliteit en wind op zee .....	9
2.3	Verschillenanalyse: beschouwing op aannames rondom elektrolyzers .....	15
2.4	Gevoeligheidsanalyse: effecten bij andere ontwikkeling dan in scenario's.....	18
2.5	Overige relevante aspecten rondom flexibiliteit en elektrolyse.....	23
3	Nationale systeemkeuzes wind op zee .....	24
3.1	Samenvatting .....	24
3.2	Inleiding.....	25
3.3	Aanpak.....	27
3.4	Resultaten .....	28
4	Vraagontwikkeling CES 3.0.....	38
4.1	Samenvatting .....	38
4.2	Introductie.....	39
4.3	Zeeland.....	40
4.4	Rotterdam – Moerdijk.....	43
4.5	Noordzeekanaalgebied .....	47
4.6	Chemelot.....	49
4.7	Noord-Nederland .....	53
4.8	Cluster 6 .....	57
4.9	Onderzoek Power-to-Industry Kalavasta .....	57
5	Meer kernenergie in het energiesysteem.....	59
5.1	Samenvatting .....	59
5.2	Inleiding.....	60
5.3	Uitgangspunten.....	60
5.4	Impact op mogelijkheden aanlanding binnen regio's.....	63
5.5	Beschouwing op impact inzetprofiel kerncentrales.....	65
6	Overige verschillen- en gevoeligheidsanalyses.....	66

6.1	Aanlanding in Lelystad .....	66
6.2	Geen netuitbreiding Randstad .....	67
6.3	Vollasturen wind op zee.....	67
6.4	Nieuwe scenario's Netbeheer Nederland.....	69
6.5	Target Grid .....	70

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Voor de beoordeling Systeemintegratie zijn integrale netwerkdoorrekeningen gedaan door TenneT en Gasunie. In deze doorrekeningen is een inschatting gemaakt van de effecten van verschillende scenario's op het hoogspanningsnet en de landelijke waterstofinfrastructuur, in 2040.

Er zijn meerdere scenario's doorgerekend om een goede inschatting te kunnen maken van de onzekerheden en de impact van verschillende configuraties van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. De scenario's variëren op twee relevante assen:

- **Overige ontwikkelingen energiesysteem/energetisch scenario.** De ontwikkeling van de energievraag en overige productiebronnen is van belang voor de impact van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. Hoe deze ontwikkelingen gaan lopen is nog onzeker.
- **Configuraties locaties aanlanding wind op zee.** Zoals eerder benoemd willen we in de doorrekeningen uitgaan van 10 elektrische aanlandingen en maximaal 2 waterstofaanlandingen. De locaties van deze aanlandingen zijn bepalend voor de impact op de energie-infrastructuur op land.

Er zijn twee energetische scenario's doorgerekend, zowel bij elektriciteit als bij waterstof. Er is gekozen voor de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie uit de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (ii3050) (Netbeheer Nederland, 2023a). Deze scenario's zijn opgesteld door Netbeheer Nederland (samenwerking van netbeheerders)<sup>1</sup>. De twee onderzochte scenario's verschillen flink van elkaar in uitgangspunten. Hieronder volgt een korte beschrijving van de twee scenario's:

- **Nationaal leiderschap.** In dit scenario wordt maximaal ingezet op elektrificatie van de energievraag, waardoor er een grote elektriciteitsvraag is. Er is naast wind op zee veel hernieuwbare opwek op land. De rol van kernenergie is beperkt. Er is relatief weinig vraag naar waterstof, door maximale inzet op elektrificatie.
- **Europese Integratie.** In dit scenario wordt naast elektrificatie ook ingezet op duurzame gassen voor verduurzaming, waardoor de elektriciteitsvraag lager ligt. Er wordt ingezet op veel kernenergie. In dit scenario is meer vraag naar waterstof. Daarnaast is er in dit scenario meer interconnectiecapaciteit bij het elektriciteitsnet vanwege de Europese focus.

Voor beide scenario's gaan we uit van 50 GW wind op zee met 10 elektrische verbindingen en één of twee waterstofaanlandingen, zodat deze in lijn zijn met de onderzoeksopgave van pVAWOZ. Dit zijn aanpassingen ten opzichte van de oorspronkelijke ii3050 scenario's. Verder zijn de cijfers van de ii3050 scenario's overgenomen.

De uitkomsten van de doorrekeningen van TenneT en Gasunie geven veel inzicht, maar zijn alleen geldig bij de uitgangspunten van de energetische scenario's en de gekozen aanlandconfiguraties. Er

---

<sup>1</sup> Er is gebruik gemaakt van de ii3050 scenario's uit 2023. Ondertussen hebben de netbeheerders nieuwe scenario's opgesteld voor 2040, die gebruikt worden voor de nieuwe investeringsplannen. Deze nieuwe scenario's zijn een update van de scenario's uit 2023. In de bijlage A Verschillen en Gevoeligheidsanalyse gaan we in op de verschillen tussen de gehanteerde scenario's en de nieuwe scenario's van Netbeheer Nederland. Het is nog niet bekend wat de impact is van deze nieuwe scenario's op de conclusies over de effecten van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land. Hier moeten de netdoorrekeningen van de netbeheerders voor hun investeringsplannen uitsluitsel over geven. Die zijn op het moment van het schrijven van dit rapport nog niet uitgevoerd.

zijn echter ook ontwikkelingen denkbaar die buiten deze uitgangspunten vallen. Hiervoor doen we verschillen- en gevoeligheidsanalyses

Bij de **verschillenanalyse** brengen we het verschil tussen de verschillende mogelijke ontwikkeling en de uitgangspunten in de doorrekening in kaart. Bij de **gevoeligheidsanalyse** brengen we de impact van de verschillen op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem in kaart. De resultaten van de verschillen- en gevoeligheidsanalyse worden gebruikt om de beoordeling Systeemintegratie te verrijken en daarbij meer inzicht te geven in onzekerheden en afhankelijkheden.

## 1.2 Welke verschillen- en gevoeligheidsanalyses worden uitgewerkt, en hoe?

Op basis van gesprekken met stakeholders en interne discussies is een lijst opgesteld van ontwikkelingen waarnaar gekeken is in verschillen- en gevoeligheidsanalyse. Hieronder volgt een overzicht van de ontwikkelingen waarin deze verschillen- en gevoeligheidsanalyse gekeken wordt. Daarbij geven we ook aan op welke manier invulling gegeven wordt aan de verschillen- en gevoeligheidsanalyse.

Tabel 1-1 Overzicht verschillen- en gevoeligheidsanalyses

Ontwikkeling	Toelichting	Wijze analyse	Toelichting
<b>Flexibiliteit en elektrolyse</b>			
Ontwikkeling flexibiliteit bij aansluitlocaties	In elk van de scenario's is een aanname gemaakt over de ontwikkeling van flexibiliteit, wat impact heeft op de inpassing voor wind op zee. Vraag is welke impact dit heeft.	Kwalitatieve beschouwing	Beschouwing op wisselwerking tussen flexibiliteit en wind op zee, en beschouwing van verschillende bronnen.
Hoeveelheid elektrolyse bij aanlandlocaties	In elk van de scenario's en aanlandconfiguraties wordt uitgegaan van ontwikkeling van elektrolyse. De vraag is wat de impact is als minder elektrolyse gerealiseerd wordt.	Kwalitatieve beschouwing	Inclusief beschouwing op aannames in scenario's.
Inzetprofiel elektrolyzers	De wijze van inzet van elektrolyzers heeft impact op de inpassing van wind op zee, en is nog onzeker.	Kwalitatieve beschouwing op basis eerder onderzoek CE Delft	
Nut en noodzaak elektrolyse bij diepe aanlanding Limburg en Brabant	Zit in doorrekening, maar in tegenstelling tot bij aanlandlocaties aan kust is het nog niet zeker of dit wel nuttig/noodzakelijk is bij diepere aanlanding.	Kwalitatieve beschouwing	Onder meer op basis van doorrekeningen. Ook beschouwing op economische afweging.
Aansluiten elektrolyzers	Reeds inschatting gemaakt aansluitcapaciteit voor elektrolyzers bij stations. Extra duiding en richtlijnen noodzakelijk.	Extra duiding + algemene richtlijnen	
<b>Overkoepelende systeemkeuzes wind op zee</b>			
Volledige elektrische aanlanding	Onzekerheid over ontwikkeling offshore elektrolyse, wat als dit niet lukt?	Doorrekening TenneT <sup>2</sup>	Doorrekening TenneT zowel voor nationale balans vraag en aanbod (marktanalyse) en impact op elektriciteitsnet (netdoorrekening)
Minder elektrische aanlanding	Bepalen impact bij andere verhouding elektrische verbindingen en waterstof	Eigen analyses CE Delft + kwalitatieve beschouwing	Doorrekening nationale balans vraag en aanbod + kwalitatieve beschouwing effecten op elektriciteitsnet
Hybride aansluitingen	Doorrekeningen gaan uit van radiale aansluitingen, maar er wordt ook naar		

<sup>2</sup> Deze doorrekening zijn gedaan met een ouder model van TenneT, in een eerdere onderzoeksrunde. Voor de basisscenario's en de overige gevoeligheidsanalyses zijn nieuwe doorrekeningen gedaan met een nieuw model, maar niet voor de gevoeligheidsanalyse *Volledige elektrische aanlanding*.

	mogelijkheid hybride aansluitingen gekeken		
Overplanting windpark ten opzichte van kabel	Bv 3 GW WoZ aansluiten op 2 GW kabel. Minder elektriciteit richting kust, maar ook minder kosten en hogere vollastfactor kabels		
<b>Ontwikkeling energievraag industrie</b>			
Ontwikkeling CES 3.0 industrie	CES 3.0 is recent afgerond. Vraag is in hoeverre de prognoses van de CES 3.0 aansluiten bij uitgangspunten scenario's.	Eigen analyse CE Delft	Eerst een verschillenanalyse om te bepalen of er verschillen zijn met de uitgangspunten van de doorgerekende scenario's. Bij grote verschillen bepalen we kwalitatief of semi-kwantitatief de impact op de aanlanding van wind op zee.
<b>Kernenergie (alleen impact op wind op zee)</b>			
Ontwikkeling van twee of vier grote kerncentrales	Huidige onderzoekopgave kernenergie zitten onvoldoende in huidige scenario's.	Netdoorrekening TenneT	Doorrekening verschillende locaties en configuraties.
Inzetprofiel kerncentrales	Heeft aanpassing van de inzetprofielen van kerncentrales nog impact? Overheid kan eisen voor profiel voor kerncentrales meegeven.	Kwalitatieve beschouwing	
<b>Overig</b>			
Aanlanding in Lelystad	In doorgerekende configuraties is geen aanlanding in Lelystad meegenomen.	Doorrekening TenneT	Twee variaties voor één aanlandconfiguratie, met één aanlanding in Lelystad in plaats van Middenmeer en in plaats van Eemshaven.
Zonder netuitbreiding in de Randstad	In doorrekeningen is een extra verbinding meegenomen tussen Beverwijk en Maasvlakte, maar (tijds) realisatie is onzeker.	Doorrekening TenneT	Doorrekening zonder deze extra uitbreiding uit het IP, om de impact daarvan op inpassing wind op zee in te schatten.
Minder vollasturen wind op zee	De windparken op zee die gerealiseerd moeten worden in de periode 2031-2040 liggen verder uit de kust dan de windparken die nu gerealiseerd worden. Dit kan effect hebben op de vollasturen van de windparken op zee.	Kwalitatieve beschouwing	Kwalitatieve beschouwing op mogelijke ontwikkeling vollasturen en impact op inpassing wind op zee.
Target Grid	Er is de wens om inzicht te krijgen in de effecten van de toekomstbeelden van Target Grid op de aanlanding van wind op zee.	Kwalitatieve beschouwing door CE en TenneT	Kwalitatieve omschrijving van status Target Grid en hoe deze plannen meegenomen zijn, en mogelijke impact op aanlanding.
Nieuwe scenario's Netbeheer Nederland	De analyses voor Systeemintegratie zijn gebaseerd op de ii3050 scenario's uit 2023. Ondertussen zijn door netbeheerders nieuwe scenario's opgesteld voor 2040, voor de nieuwe investeringsplannen.	Vergelijking aannames	Op dit moment niet mogelijk om conclusies te trekken over impact op conclusies over inpassing wind op zee, omdat regionalisatie nieuwe scenario's en netdoorrekening nog niet zijn uitgevoerd.

### 1.3 Leeswijzer

Dit document bevat de uitgewerkte verschillen- en gevoeligheidsanalyses, onderverdeeld per thema:

- **Hoofdstuk 2** bevat de analyses en beschouwingen over flexibiliteit en elektrolyse.
- **Hoofdstuk 3** bevat de analyses en beschouwingen over de overkoepelende systeemkeuzes voor wind op zee.
- **Hoofdstuk 4** bevat de verschillen- en gevoeligheidsanalyse voor de CES 3.0.
- **Hoofdstuk 5** bevat de verschillen- en gevoeligheidsanalyse voor kernenergie.
- **Hoofdstuk 6** bevat de overige verschillen- en gevoeligheidsanalyses.

Elk hoofdstuk bevat aan het begin een samenvatting met de belangrijkste bevindingen, en daarnaast een uitgebreidere uitwerking.

**Verschillen- en gevoeligheidsanalyses - Bijlage beoordeling Systeemintegratie Programma VAWOZ, versie 5.1 - Definitief**

## 2 Flexibiliteit en elektrolyse

### 2.1 Samenvatting

Richting 2040 zal inzet van flexibiliteitsbronnen, zoals batterijen en elektrolyzers, noodzakelijk zijn voor het balanceren van vraag en aanbod van het energiesysteem en kan bijdragen efficiënte benutting van de windenergie. Maar inzet van flexibiliteitsbronnen heeft ook impact op de inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur op land, door extra stroomafname te genereren op momenten met lokale overschotten van wind op zee. Verschillende bronnen van flexibiliteit kunnen bijdragen aan de inpassing van wind op zee, maar elektrolyzers dragen hier naar verwachting het meeste aan bij. Ook curtailment van wind op zee draagt bij aan het integreren van windstroom. Inzet van batterijen kan wat bijdragen aan lokale benutting en daarmee aan inpassing van wind op zee, maar de impact is beperkt. Batterijen zijn wel nodig voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit op nationaal niveau, maar vanuit het perspectief van integratie elektriciteit van wind op zee is het niet persé nodig dat dit op de aansluitlocaties van wind op zee gebeurt.

De hoeveelheid elektrolyse die gerealiseerd wordt op deze locaties heeft impact op de inpassing van wind op zee, en op de hoeveelheid (elektrische) aanlanding van wind op zee die mogelijk is per regio. Een elektrolyser kan voor een positieve bijdrage zorgen, door de belasting op hoogspanningsverbindingen te verlagen door elektriciteit te gebruiken voor de conversie naar waterstof. Hierdoor kan eventueel extra elektrische aanlanding gerealiseerd worden of kunnen investeringen in hoogspanningsverbindingen uitgespaard worden.

In de doorgerekende scenario's, die de basis vormen voor de beoordeling systeemintegratie, zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling rondom elektrolyse (hoeveelheid, wijze van inzet en locaties). De onderstaande tabel geeft een overzicht hoe de aannames over de ontwikkeling van elektrolyse zich verhouden tot de huidige plannen.

Tabel 2-1 – Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Kop van Noord-Holland	0 MW	400 – 1.750 MW <sup>3</sup>	100 – 900 MW
Noord-Holland Zuid	0 – 600 MW	650 – 700 MW	400 MW
Zuid-Holland	200 – 2.100 MW	3.000 – 5.500 MW	1.900 – 3.200 MW
Zeeland	0 – 900 MW	2.500 – 3.500 MW	1.450 – 1.900 MW
Noord Nederland	0 – 1.000 MW	1.000 – 3.900 MW	500 – 2.000 MW
Moerdijk/Geertruidenberg	0 MW	700 – 1.900 MW	400 – 1.100 MW
Totaal van regio's	200 – 4.500 MW		

<sup>3</sup> Dit is bij minimaal 1 elektrische verbinding. Zonder elektrische verbinding in Kop van Noord-Holland is grootschalige elektrolyse vanuit systeemperspectief niet nuttig.

### **Inschatting bestaande plannen elektrolyzers**

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen.

Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij realisatie van de bovengrens van de huidige plannen komt het vermogen in de meeste regio's al in de buurt (bij de onderkant van de bandbreedte) van het scenario Europese Integratie. De huidige plannen lopen met name tot 2030 en het scenario gaat over de situatie in 2040, wat impliceert dat de aannames in dit scenario haalbaar lijken bij realisatie van de bestaande plannen. Echter, de huidige plannen zijn erg onzeker omdat er nog vrijwel geen definitieve investeringsbeslissingen genomen zijn.
- Voor de vermogens aan elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap is nog een forse toename nodig van de elektrolysecapaciteit bovenop de bestaande plannen.

Bovenstaande analyse laat zien dat het geen zekerheid is dat de hoeveelheid elektrolyse die aangenomen is in de scenario's ook daadwerkelijk gerealiseerd wordt. Aan de anderen kant zijn er ook industrieclusters die een ambitie voor de ontwikkeling van elektrolyse hebben die hoger ligt dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. De vraag is wat de impact van de ontwikkeling van elektrolyse, en andere flexibele vraag, is op het aantal elektrische verbindingen dat inpasbaar is per regio en of ontwikkeling van flexibele vraag randvoorwaardelijk is.

De belangrijkste conclusies over de impact van de ontwikkeling van flexibele vraag (en met name elektrolyse) op de mogelijkheden voor aanlanding zijn:

- Er zijn twee scenario's doorgerekend (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie), waarbij het scenario Europese Integratie van een stuk minder elektriciteitsvraag en elektrolyse uitgaat. In Zuid-Holland lijkt in het scenario Nationaal Leiderschap één elektrische aanlanding ingepast te kunnen worden dan in het scenario Europese Integratie, door de grotere elektriciteitsvraag en elektrolysecapaciteit. In de andere regio's is het aantal elektrische aanlandingen dat ingepast kan worden in beide scenario's gelijk.
- Het is in de praktijk mogelijk dat nog minder elektrolyse gerealiseerd wordt dan in het scenario Europese Integratie. In dat geval zijn ook in andere regio's één of twee elektrische verbindingen minder inpasbaar, maar:
  - Als elektrolyse niet van de grond komt dan is er ook een stuk minder elektriciteitsvraag. Een scenario met 50 GW wind op zee in 2040 met (vrijwel) geen elektrolyse en overige flexibele bronnen (en de verwachte vraagontwikkeling richting 2040) lijkt vanuit systeemintegratie bezien niet efficiënt.
  - Ook andere bronnen van (flexibele) elektriciteitsvraag kunnen bijdragen aan de inpassing van wind op zee, als de ontwikkeling van elektrolyse achterblijft.
  - Dit heeft ook impact voor de invulling van de waterstofvraag. Daardoor zijn meer andere bronnen van waterstof, zoals import, nodig om aan de waterstofvraag te voorzien.
- In verschillende CES'en is voor de ontwikkeling van elektrolyse een hogere ambitie opgenomen dan de bovengrens van de gehanteerde scenario's. In dat geval zouden mogelijk meer elektrische verbinding ingepast kunnen worden. Er is dan echter wel een forse toename en

versnelling van de uitrol van elektrolyse nodig, terwijl de huidige (concrete) plannen juist achterblijven bij de aannames in de scenario's.

- Vanwege bovenstaande punten gaan we voor de beoordeling van Systeemintegratie uit van de ontwikkeling van flexibiliteit in de twee doorgerekende scenario's. Er zit al een flink verschil tussen de scenario's, wat betekent dat we al uitgaan van een flinke bandbreedte.
- De impact van elektrolyzers (en andere bronnen van flexibiliteit) op de inpassing van wind op zee is afhankelijk van de wijze waarop deze bronnen ingezet worden. We verwachten dat de inzet sterk gecorreleerd zal zijn met de invoeding van wind op zee (vanwege marktprikkels en eisen vanuit de REDIII). Wel kunnen er momenten zijn waarop de inzet van elektrolyzers afwijkt van invoeding van wind op zee:
  - Als er veel invoeding van wind op zee is, maar de elektriciteitsprijzen hoog zijn (door hoge vraag). Dan draaien elektrolyzers niet, wat tot knelpunten op het hoogspanningsnet door afvoer van elektriciteit vanaf aansluitlocaties kan leiden. Middels redispatch kan gezorgd worden dat elektrolyzers (tegen een vergoeding) toch draaien op deze uren.
  - Als er weinig invoeding van wind op zee is, maar de elektriciteitsprijzen laag zijn (door veel zon). Dan draaien elektrolyzers wel, wat tot knelpunten op het hoogspanningsnet door aanvoer van elektriciteit richting aansluitlocaties kan leiden. Met alternatieve transportrechten voor elektrolyzers kan dit risico gemitigeerd worden.

Elektrolyzers kunnen bij aansluitlocaties aan de kust bijdragen aan de inpassing van wind op zee. De situatie is bij diepe aanlanding (bij Tilburg en in Limburg) echter anders. We verwachten dat grootschalige elektrolyse bij diepe aanlanding, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk is. De redenen hiervoor zijn:

- Het is naar verwachting efficiënter om de aangelande windstroom in Limburg en Tilburg door te voeren richting andere delen van Nederland of te exporteren richting België en Duitsland, en op andere locaties in Nederland (aan de kust) grootschalige elektrolyse toe te passen.
- Het is erg kostbaar om diepe aanlanding te realiseren. Dat roept de vraag op of het kosteneffectief is om elektriciteit van windparken op zee naar het binnenland te transporteren en vervolgens daar om te zetten in waterstof. Als de elektriciteit niet lokaal benut kan worden, of geëxporteerd kan worden, dan is het naar verwachting meer kosteneffectief om minder diepe aanlandingen te realiseren.

Voor aansluitlocaties Moerdijk en Geertruidenberg is realisatie van grootschalige elektrolyse vanuit het perspectief van systeemintegratie naar verwachting wel nuttig en wenselijk.

## 2.2 Introductie flexibiliteit en wind op zee

In deze paragraaf gaan we in op de wisselwerking tussen flexibiliteit en de inpassing van wind op zee. De focus ligt daarbij op het elektriciteitssysteem. Echter, elektrolyzers produceren groene waterstof. Dus de ontwikkeling van elektrolyzers zijn ook van belang voor het invullen van de vraag naar (groene) waterstof. Bij minder ontwikkeling van elektrolyzers zijn er andere bronnen van waterstof nodig om aan de vraag naar (groene) waterstof te voorzien.

### 2.2.1 Beschouwing op wisselwerking wind op zee en flexibiliteit in het elektriciteitssysteem

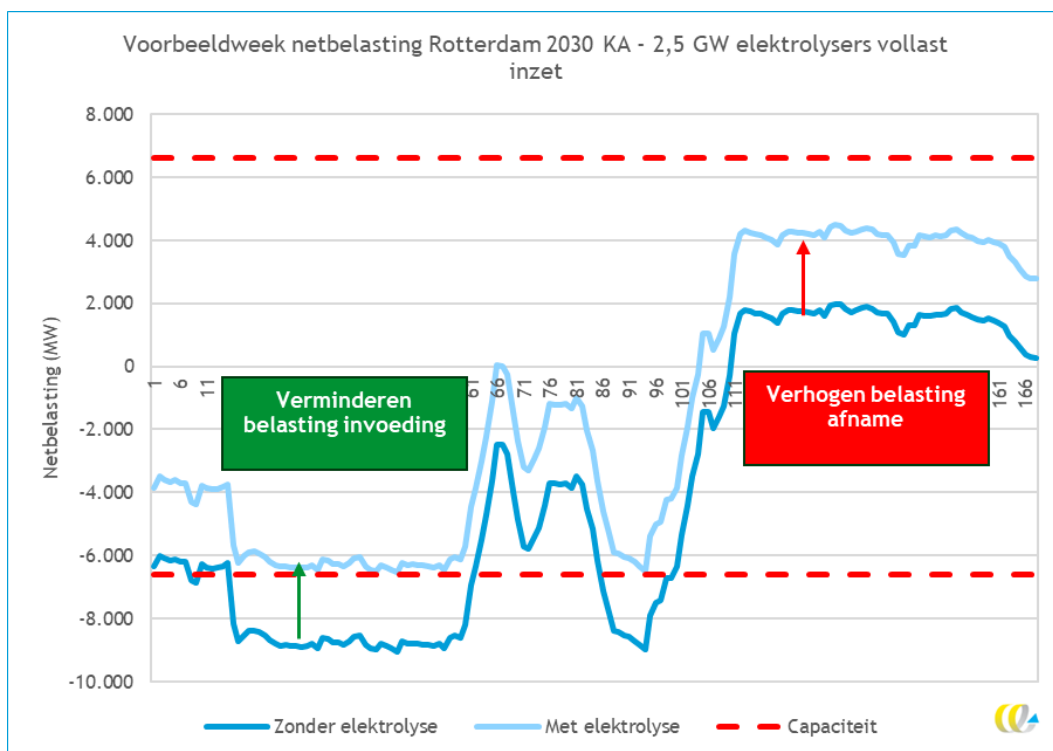
Richting 2040 zal inzet van flexibiliteitsbronnen, zoals batterijen en elektrolyzers, noodzakelijk zijn voor het balanceren van vraag en aanbod van het elektriciteitssysteem. Maar inzet van flexibiliteitsbronnen heeft ook impact op de (elektrische) aanlanding van wind op zee. De inzet van flexibiliteitsbronnen kan ervoor zorgen dat meer windenergie efficiënt benut kan worden. Bij directe benutting van elektriciteit vinden minder energieverliezen plaats. Maar in 2040 kan slechts een beperkt deel van de windenergie direct gebruikt worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag. Enerzijds komt dit doordat de totale omvang van de energieproductie van de windparken op zee in 2040 groter is dan de elektriciteitsvraag, maar dit komt ook voor een belangrijk deel door ongelijktijdigheid van productie en vraag.

Inzet van flexibiliteitsbronnen kunnen ervoor zorgen dat de productie van de windparken op zee beter matchen met de elektriciteitsvraag, door flexibele vraag of opslag van elektriciteit. Zo kan meer windenergie gebruikt worden in de vorm van elektriciteit. De resterende overschotten van de windparken op zee kunnen omgezet worden in waterstof met elektrolyse, op zee of op land. Zo kan deze elektriciteit ook nog nuttig benut worden om waterstof te produceren die nodig is om bijvoorbeeld de industrie of zwaar transport te verduurzamen. Zonder de elektriciteitsvraag van flexibiliteitsbronnen zal minder aanbod van wind op zee noodzakelijk zijn om aan de nationale vraag naar elektriciteit te voorzien.

De inzet van bronnen van flexibiliteit heeft ook impact op de netbelasting. Ze nemen namelijk elektriciteit af van het netwerk. Afhankelijk van hoe de bron van flexibiliteit wordt ingezet, kan deze de belasting op het elektriciteitsnet verlagen of verhogen:

- Als een bron van flexibiliteit stroom afneemt op momenten dat er in de regio meer invoeding dan afname is (en er dus netto stroom ingevoerd wordt), dan verlaagt het de netbelasting doordat minder stroom afgevoerd hoeft te worden.
- Als een bron van flexibiliteit stroom afneemt op momenten dat er in de regio meer afname is dan invoeding (en er dus netto stroom afgenomen wordt), dan verhoogt het de netbelasting doordat meer stroom afgenomen wordt.

Bovenstaande wordt geïllustreerd in Figuur 2-1. Deze figuur toont de impact van elektrolyzers op de netbelasting, voor een voorbeeldweek bij de situatie met 2,5 GW elektrolyse die vollast aanstaat in Rotterdam. Dit voorbeeld komt uit een ander onderzoek van CE Delft. De positieve waarden komen overeen met netto-invoeding van elektriciteit, negatieve waarden met netto-afname van elektriciteit. Op momenten met veel aanbod van elektriciteit wordt de belasting door invoeding van elektriciteit een stuk verminderd door inzet van elektrolyzers. Op momenten met weinig lokaal aanbod kan inzet van elektriciteit leiden tot extra netbelasting door afname elektriciteit.



Figuur 2-1 Illustratie impact elektrolyzers op netbelasting, scenario 2030 KA – 2,5 GW elektrolyzers vollast. Negatieve waarden komen overeen met netto-invoeding, positieve waarden met netto-afname

De grootste pieken worden bij de aansluitlocaties veroorzaakt door invoeding van elektriciteit van wind op zee. Indien flexibiliteitsbronnen geplaatst worden op de aansluitlocaties, dan kunnen deze ervoor zorgen dat meer elektriciteit direct op die locaties benut worden. Overschotten van elektriciteit worden hierdoor direct op de aansluitlocaties gebruikt en hoeven niet verder getransporteerd te worden via hoogspanningsverbindingen. Zo zorgen flexibiliteitsbronnen dat meer elektrische aanlanding mogelijk is op aansluitlocaties, voordat uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur noodzakelijk zijn. Inzet van elektrolyse op zee kan, indien het gecombineerd wordt met hybride aansluitingen (combinatie elektrisch en waterstof), ook zorgen dat meer elektriciteit direct benut kan worden op de locaties doordat het leidt tot een hogere bedrijfstijd van de elektrische aansluiting.

## 2.2.2 Beschouwing op verschillende bronnen van flexibiliteit

Er zijn verschillende flexibiliteitsbronnen die kunnen bijdragen aan de integratie van wind op zee. Hieronder bespreken we belangrijkste technieken:

- **Elektrolyzers.** Elektrolyse, het omzetten van elektriciteit, heeft twee doelen. Enerzijds kan het ingezet worden voor de balancering van het elektriciteitssysteem door overschotten van elektriciteit op te vangen. Daarnaast kan middels elektrolyse waterstof geproduceerd nodig zijn voor de verduurzaming van delen van de industrie en mobiliteit. Idealiter worden deze functies gecombineerd.

Elektrolyzers op land of zee zullen worden ingezet om overschotten van elektriciteit om te zetten in waterstof. Indien elektrolyzers op land geplaatst worden dan heeft het de voorkeur om deze bij de aansluitlocaties te plaatsen. In dat geval kunnen deze worden ingezet om direct op locatie overschotten van elektriciteit om te zetten in waterstof. Hierdoor hoeven deze overschotten niet verder getransporteerd te worden via het hoogspanningsnet, waardoor er minder belasting is op het hoogspanningsnet. Elektrolyzers bij aansluitlocaties kunnen, in sommige gevallen, ook extra knelpunten door afname van elektriciteit veroorzaken. Dit komt

doordat elektrolyzers ook op momenten met weinig aanbod van wind op zee ingezet zullen worden, op momenten dat er veel productie is van zon-pv.

- **Curtailement.** Bij voorkeur worden overschotten van elektriciteit nuttig benut, bijvoorbeeld met vraagsturing, batterijen of elektrolyse. Maar voor de hoogste pieken van de productie is dit niet rendabel. Daarom zal in de toekomst een deel van de hernieuwbare elektriciteit gecurtailed worden, wat inhoudt dat de capaciteit van windmolens (of zonneparken) tijdelijk wordt teruggeschroefd, door de windmolens stil te zetten. Het aftoppen van de grootste pieken van de productie van wind op zee zorgt voor minder grote lokale overschotten van elektriciteit waardoor minder transport via het hoogspanningsnet noodzakelijk is.
- **Vraagsturing en power-to-heat industrie.** De energie-intensieve industrie opereert voornamelijk op vollast. Dit betekent dat zij het hele jaar constant draaien. Bij vraagsturing worden de productievolumes op- of afgeregeld op basis van de beschikbare elektriciteit van wind op zee. Bij power-to-heat wordt extra warmte geproduceerd en opgeslagen in buffers. Er zijn hiervoor ook hybride opties mogelijk, waarbij een deel van de warmtevraag van de industrie ingevuld wordt met fossiele brandstoffen en deel met power-to-heat (op momenten met veel productie van wind op zee).

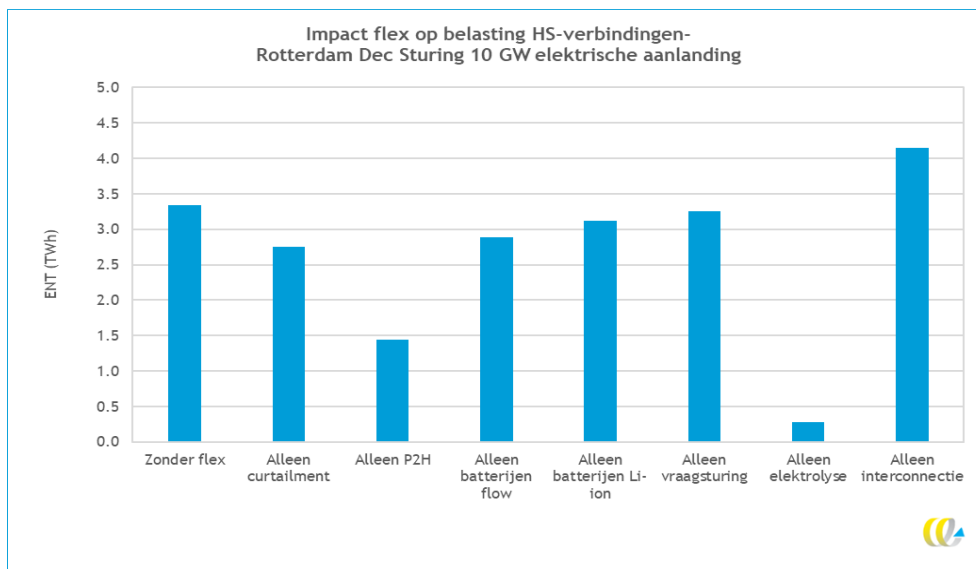
Bij zowel vraagsturing als power-to-heat wordt extra elektriciteitsvraag gegenereerd op momenten met veel productie van wind op zee. Zo kan een groter deel van de windenergie nuttig benut worden in de vorm van elektriciteit. Daarnaast kan een groter deel van de elektriciteit direct benut worden op de aansluitlocatie, waardoor minder transport van overschotten via het hoogspanningsnet noodzakelijk is.

- **Interconnectie.** Het Nederlandse elektriciteitsstelsel staat niet op zichzelf, maar is verbonden met de buurlanden. Het is de verwachting dat de interconnectiecapaciteit met het buitenland zal toenemen richting de toekomst. De uitwisseling van elektriciteit met het buitenland is afhankelijk van de relatieve elektriciteitsprijzen in Nederland ten opzichte van de andere landen. Op het moment met overschotten van elektriciteit van wind op zee worden de prijzen in Nederland laag en zal naar verwachting met name export plaatsvinden, behalve als in nabijgelegen landen nog meer overschotten van elektriciteit hebben. Export van elektriciteit kan ertoe leiden dat meer windstroom vanaf de Noordzee richting het binnenland getransporteerd moet worden, wat tot extra knelpunten op het hoogspanningsnet kan leiden. De bestaande en geplande DC-interconnecties bij Rotterdam en de Eemshaven hebben daarnaast ook impact op het transport van elektriciteit vanaf deze locaties.
- **Batterijen.** Batterijen kunnen elektriciteit opslaan op momenten van overschotten en deze elektriciteit weer invoeden op momenten van tekorten. Batterijen kunnen ervoor zorgen dat een groter deel van de windenergie nuttig benut kan worden als elektriciteit, door overschotten op te slaan en later weer in te voeden op momenten dat de elektriciteitsvraag niet volledig ingevuld wordt door wind op zee, wind op land en zon-pv.
  - Als batterijen geplaatst worden op aansluitlocaties, dan kunnen deze een deel van de lokale overschotten opslaan en er daarmee voor zorgen dat minder overschotten getransporteerd hoeven te worden via het elektriciteitsnet.
  - Flowbatterijen, of andere vormen van lange-termijn opslag, zijn geschikter dan Li-ion voor de integratie van wind op zee, aangezien flowbatterijen voor langere periodes elektriciteit kunnen opslaan en de overschotten van wind op zee doorgaans langere tijd aanhouden (uren of dagen, soms nog langer).

Het verschilt per type flexibiliteitsbron in welke mate ze kunnen bijdragen aan het verminderen van de lokale overschotten en daarmee op de belasting op de hoogspanningsnet. Figuur 2-2 en Figuur 2-3 geven voor twee specifieke situaties weer wat de impact van de verschillende flexibiliteitsbronnen is op de energie die niet getransporteerd kan worden door de afvoerende

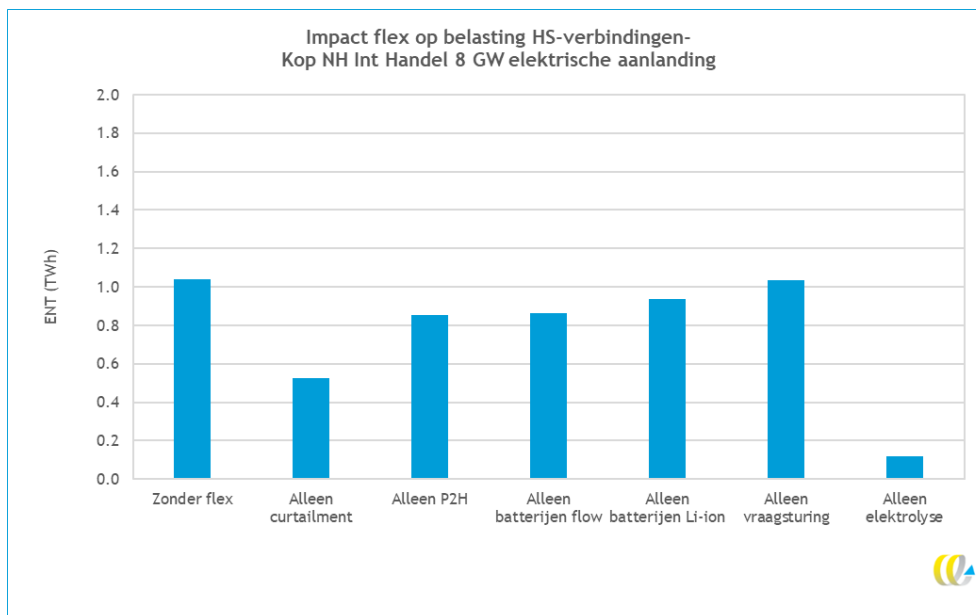
hoogspanningsverbindingen (ENT). Dit zijn analyses die uitgevoerd zijn bij de Startanalyse Systeemintegratie van pVAWOZ (CE Delft, 2024).

Figuur 2-2 geeft de impact voor het cluster Rotterdam in het scenario Decentrale Initiatieven, met in totaal 10 GW elektrische aanlanding. De figuur laat zien dat curtailment een kleine bijdrage aan het verminderen van lokale overschotten. In Rotterdam is veel industrie aanwezig. Daardoor kan power-to-heat van deze industrie een significante bijdrage leveren aan het opnemen van de lokale overschotten. De impact van vraagsturing is daarentegen beperkt. Inzet van batterijen heeft weinig impact op het verminderen van de lokale overschotten, al zijn flowbatterijen hiervoor wel iets geschikter van Li-ion batterijen. Elektrolyse heeft de grootste impact op het opnemen van lokale overschotten en het verlagen van de elektriciteit die niet afgevoerd kan worden en dat dit in dit geval de belangrijkste bron van flexibiliteit is die ervoor zorgt dat meer elektrische aanlanding mogelijk is.



Figuur 2-2 Impact flexibiliteitsbronnen op belasting HS-verbindingen, Rotterdam Decentrale Sturing 10 GW

Figuur 2-3 toont de impact van flexibiliteitsbronnen op de belasting op de HS-verbindingen in het scenario Internationale Handel bij in totaal 8 GW elektrische aanlanding (en 4 380 kV-circuits tussen kop NH en NZKG). In de kop van Noord-Holland is weinig industrie, daarom is de impact van Power-to-Heat hier relatief kleiner. Verder is het beeld vergelijkbaar met de situatie in Rotterdam. Elektrolyse levert de grootste bijdrage aan het faciliteren van extra elektrische aanlanding en daarna curtailment. De inzet van batterijen heeft slechts een kleine impact op het verminderen van lokale overschotten van elektriciteit.



Figuur 2-3 Impact flexibiliteitsbronnen op belasting HS-verbindingen, Kop van Noord-Holland Internationale Handel 8 GW

In de praktijk wordt geen keuze gemaakt tussen de verschillende flexibiliteitsbronnen, maar zullen al deze vormen van flexibiliteit nodig zijn voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit op nationaal niveau. Het handhaven van deze systeembalans zal de belangrijkste driver zijn voor het realiseren van deze flexibiliteitsbronnen. De hiervoor genoemde analyse levert echter wel inzicht op voor de vraag of het zinvol is dat deze flexibiliteitsbronnen op aansluitlocaties voor wind op zee te realiseren, aangezien ze dan ook kunnen bijdragen aan de integratie van elektrische aanlanding van wind op zee in het elektriciteitssysteem op land.

Uit de analyses volgt dat het voor de integratie van elektrische aanlanding van wind op zee in het elektriciteitssysteem op land belangrijk is om elektrolyzers te realiseren op de aansluitlocaties, in plaats van op andere locaties in het land. Ook curtailment van wind op zee draagt bij aan het integreren van windstroom. Inzet van batterijen heeft weinig impact op integratie van elektrische aanlanding van wind op zee in het hoogspanningsnet. Batterijen zijn wel nodig voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit op nationaal niveau, maar vanuit het perspectief van integratie elektriciteit van wind op zee is het niet persé nodig dat dit op de aansluitlocaties van wind op zee gebeurt. Al kunnen er andere overwegingen zijn om batterijen op deze locaties te plaatsen, zoals de grote hoeveelheid transportcapaciteit op deze locaties.

Elektrolyzers bij aansluitlocaties kunnen ook extra knelpunten door afname van elektriciteit veroorzaken. Dit komt doordat elektrolyzers ook op momenten met weinig aanbod van wind op zee ingezet zullen worden, op momenten dat er veel productie is van zon-pv. Dit is een aandachtspunt bij de realisatie van elektrolyzers op de aansluitlocaties, met name op locaties met veel elektrificatie van industrie en grote vermogens elektrolyse. De netto-impact van elektrolyzers op het hoogspanningsnet en de inpassing van wind op zee bij de aansluitlocaties zal echter nog wel positief zijn, omdat het afvoeren van elektriciteit in elk van de regio's de grootste uitdaging is voor de inpassing van meer wind op zee

### 2.2.3 Wat wordt meegenomen in de analyses voor systeemintegratie?

De beoordeling systeemintegratie wordt voornamelijk gebaseerd op uitkomsten van netdoorrekeningen van TenneT en Gasunie. In deze doorrekeningen wordt een inschatting gemaakt

van de effecten van verschillende scenario's op het hoogspanningsnet en de landelijke waterstofinfrastructuur, in 2040. Hierin zijn ook aannames gemaakt over de ontwikkeling van de verschillende bronnen van flexibiliteit. Er zijn aannames gemaakt over de vermogens aan flexibiliteitsbronnen, de inzet van deze bronnen (per uur) en de ruimtelijke verdeling (welk aandeel op welke locatie)

Onderstaande tabel geeft een overzicht vermogens voor de flexibiliteitsbronnen in de gehanteerde scenario's.

Tabel 2-2 Overzicht voornaamste kengetallen scenario's I13050 voor 2040

	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie
Elektrolyse	16,8 GW	8,5 GW
Power-to-heat	10,0 GW	4,5 GW
Batterijen inclusief EV	42 GW	29 GW
Vraagsturing industrie	5,1 GW	2,6 GW
Regelbare centrales	15 GW	14 GW

## 2.3 Verschillenanalyse: beschouwing op aannames rondom elektrolyzers

De vorige paragraaf laat zien dat met name elektrolyzers, op de aansluitlocaties voor wind op zee, een grote bijdrage kunnen leveren aan een efficiënte inpassing van wind op zee. Dat is ook de reden dat er in het Programma VAWOZ ruimte gezocht wordt voor grootschalige elektrolyse bij de aansluitlocaties.

De hoeveelheid elektrolyse die gerealiseerd wordt op deze locaties heeft impact op de inpassing van wind op zee, en op de hoeveelheid (elektrische) aanlanding van wind op zee die mogelijk is per regio. Een elektrolyser kan voor een positieve bijdrage zorgen, door de belasting op hoogspanningsverbindingen te verlagen door elektriciteit te gebruiken voor de conversie naar waterstof. Hierdoor kan eventueel extra elektrische aanlanding gerealiseerd worden of kunnen investeringen in hoogspanningsverbindingen uitgespaard worden. Dit is echter alleen het geval als de flexibele vraag gecorreleerd is aan de productie van wind op zee (op dezelfde momenten).

In de doorgerekende scenario's, die de basis vormen voor de beoordeling systeemintegratie, zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling rondom elektrolyse (hoeveelheid, wijze van inzet en locaties). In deze paragraaf geven we een beschouwing op deze aannames. We plaatsen ze in perspectief ten opzichte van de huidige plannen, om het realiteitsgehalte van de aannames in te schatten. Vervolgens geven we een (kwalitatieve) beschouwing op de effecten en implicaties op de inpassing van wind op zee als minder elektrolyse gerealiseerd wordt. Daarnaast geven we een inschatting van de impact van de wijze van inzet van elektrolyzers en geven we een beschouwing op de nut en noodzaak van elektrolyse in Noord-Brabant en Limburg.

### 2.3.1 Wat is nu aangenomen in de scenario's?

In elk van de scenario's en aanlandconfiguraties wordt uitgegaan van ontwikkeling van elektrolyse. De totale hoeveelheid elektrolyse in Nederland verschilt tussen de twee energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie), maar is gelijk voor verschillende aanlandconfiguraties. De verdeling van de elektrolysecapaciteit over de verschillende locaties is echter wel afhankelijk van de aanlandconfiguratie; bij meer elektrische aanlanding in een regio wordt ook uitgegaan van meer elektrolyse (aangezien dan meer elektrolyse ook wenselijk is).

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de hoeveelheid elektrolyse die nu meegenomen is in beide scenario's, bij verschillende hoeveelheden elektrische aanlanding. De tabel laat zien dat er al

een duidelijk verschil zitten tussen de twee doorgerekende scenario's. In het scenario Europese Integratie wordt al uitgegaan van een stuk minder elektrolyse dan bij Nationaal Leiderschap. Dit betekent dat de doorrekening van dit scenario al effecten laat zien bij minder elektrolysecapaciteit.

Tabel 2-3 Hoeveelheden elektrolyse in doorgerekende scenario's

Regio	Nationaal Leiderschap					Europese Integratie					
	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	
Kop van Noord-Holland	0	400	1100	1750		0	100	500	900		MW
Noord-Holland Zuid	650	700	700			400	400	400			MW
Zuid-Holland	3000	3800	4600	5500		1900	2300	2700	3200		MW
Zeeland	2500	2800	3500			1450	1550	1900			MW
Noord Nederland	1000	1800	2600	3200	3900	500	900	1300	1600	2000	MW
Moerdijk/ Geertruidenberg	700	1100	1900			400	700	1100			MW

### 2.3.2 Hoe verhouden de aannames zich tot de huidige plannen?

In het Programma VAWOZ wordt gezocht naar ruimte voor grootschalige elektrolyzers nabij de aansluitlocaties voor wind op zee, voor de periode 2031-2040. Er zijn nu echter ook al een flink aantal plannen voor elektrolyzers, met name voor de periode tot 2030. We hebben een inschatting gemaakt van de omvang van de huidige plannen voor elektrolyzers. Dit dient twee doelen:

- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's voor 2040 geeft een indicatie van de hoeveelheid ruimte die nog nodig is per regio voor extra elektrolyzers waarnaar gezocht kan worden binnen het Programma<sup>4</sup>.
- Het verschil tussen de bestaande plannen en de vermogens aan elektrolyse in de scenario's geeft een indicatie van de haalbaarheid van de aangenomen vermogens in de scenario's.

Tabel 2-4 geeft een overzicht van de huidige plannen voor elektrolyzers, per regio. Daarbij maken we onderscheid tussen harde plannen, waar een definitieve investeringsbeslissing (FID<sup>5</sup>) genomen is, en zachte plannen waarbij dit niet het geval is.

#### Inschatting bestaande plannen elektrolyzers

Voor de inschatting van de bestaande plannen van elektrolyzers is gebruik gemaakt van een analyse uit een (niet-publiek) onderzoek van CE Delft uit 2024. Hierin is een inventarisatie gemaakt van publiek bekendgemaakte plannen. Minder concrete plannen, die nog niet bekend zijn gemaakt, zijn hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn nieuwe plannen sinds 2024 niet meegenomen. Daarnaast is het mogelijk dat een deel van de bestaande plannen ondertussen is stopgezet, wat ook niet meegenomen is. Dit betekent dat de inschatting van de bestaande plannen geen absolute waarheid is, maar dit geeft wel een indicatie van de omvang van de bestaande plannen.

De bekende plannen verschillen in mate van concreetheid. Daarom is ook aangegeven voor welke plannen een investeringsbeslissing genomen is genomen.

De tabel laat zien dat er weliswaar veel plannen zijn voor de ontwikkeling van elektrolyzers (tot 4,5 GW in totaal), maar dat er nog vrijwel geen definitieve investeringsbeslissingen genomen zijn. Dit

<sup>4</sup> De hoeveelheid elektrolyse (per regio en in totaal) in de doorgerekende scenario's geeft een indicatie hoeveel elektrolyse nuttig is per regio, voor het energiesysteem, en kan dienen als een 'richtwaarde'. Dat is nuttig, om een gevoel te krijgen hoeveel ruimte nodig is voor elektrolyzers in verschillende regio's. Maar het is wel belangrijk om te benoemen dat dit uiteindelijk slechts een modeluitkomst is, en dat het geen absolute waarheid is. Er zijn ook andere afwegingen te maken, en andere marktontwikkelingen mogelijk, die kunnen leiden tot meer of minder elektrolyzers.

<sup>5</sup> Final Investment Decision

komt doordat het op dit moment nog niet mogelijk is om een sluitende business case te krijgen voor elektrolyzers. De meeste zachte plannen voor elektrolyzers zijn er voor Zuid-Holland, maar ook voor Zeeland, Noord-Nederland en Noord-Holland Zuid zijn er verschillende initiatieven.

Tabel 2-4 Overzicht bestaande plannen elektrolyzers, per regio

Regio	Harde plannen	Zachte plannen	Totaal	Opmerkingen
Noord-Holland Noord	0 MW	0 MW	0 MW	
Noord-Holland Zuid	0 MW	600 MW	600 MW	
Zuid-Holland	200 MW	1.500 – 1.900 MW	1.700 – 2.100 MW	
Zeeland	0 MW	700 – 900 MW	700 – 900 MW	
Noord Nederland	0 MW	300 – 1.000 MW	300 – 1.000 MW	Exclusief North2, te vroeg stadium en onzeker.
Moerdijk/Geertruidenberg	0 MW	0 MW	0 MW	
<b>Totaal van regio's</b>	<b>200 MW</b>	<b>3.000 – 4.300 MW</b>	<b>3.200 – 4.500 MW</b>	

De onderstaande tabel geeft een vergelijking tussen de huidige plannen en de bandbreedte voor elektrolyse in de scenario's. Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij realisatie van de bovengrens van de huidige plannen komt het vermogen in de meeste regio's al in de buurt (of bij de onderkant van de bandbreedte) van het scenario Europese Integratie. De huidige plannen lopen met name tot 2030 en het scenario gaat over de situatie in 2040, wat impliceert dat de aannames in dit scenario haalbaar lijken bij realisatie van de bestaande plannen. Echter, de huidige plannen zijn erg onzeker omdat er nog vrijwel geen definitieve investeringsbeslissingen genomen zijn.
- Voor de vermogens aan elektrolyse in het scenario Nationaal Leiderschap is nog een forse toename nodig van de elektrolysecapaciteit bovenop de bestaande plannen.
- In Noord-Holland Zuid is de bovengrens van de huidige plannen al vrijwel gelijk aan de aannames in de scenario's.
- In Zuid-Holland en Noord-Nederland is de bovengrens van de huidige plannen al gelijk aan de aangenomen hoeveelheden bij het scenario Europese Integratie met weinig extra aanlanding van wind op zee. Bij meer aanlanding van wind op zee en bij het scenario Nationaal Leiderschap is de aangenomen hoeveelheid elektrolyse nog wel meer dan de bovengrens van de plannen.
- In Zeeland is in ieder geval nog meer elektrolyse nodig bovenop de bestaande plannen om tot de aangenomen hoeveelheden uit de scenario's te komen.
- In Noord-Holland Noord zijn er nog geen plannen voor grootschalige elektrolyse. Bij elektrische aanlanding van wind op zee in deze regio is wel grootschalige elektrolyse wenselijk.
- Ook bij Moerdijk en Geertruidenberg zijn er nog geen plannen voor grootschalige elektrolyse. Daar is, ook zonder extra elektrische aanlanding in pVAWOZ, grootschalige elektrolyse wenselijk vanwege de geplande aanlanding van Nederwiek 3 (meer hierover in paragraaf 2.5.1).

Tabel 2-5 Vergelijking huidige plannen met aannames scenario's

Regio	Plannen	Bandbreedte scenario Nationaal Leiderschap	Bandbreedte scenario Europese Integratie
Kop van Noord-Holland	0 MW	400 – 1.750 MW <sup>6</sup>	100 – 900 MW
Noord-Holland Zuid	0 – 600 MW	650 – 700 MW	400 MW
Zuid-Holland	200 – 2.100 MW	3.000 – 5.500 MW	1.900 – 3.200 MW
Zeeland	0 – 900 MW	2.500 – 3.500 MW	1.450 – 1.900 MW
Noord Nederland	0 – 1.000 MW	1.000 – 3.900 MW	500 – 2.000 MW
Moerdijk/Geertruidenberg	0 MW	700 – 1.900 MW	400 – 1.100 MW
<b>Totaal van regio's</b>	<b>200 – 4.500 MW</b>		

<sup>6</sup> Dit is bij minimaal 1 elektrische verbinding. Zonder elektrische verbinding in Kop van Noord-Holland is grootschalige elektrolyse vanuit systeemperspectief niet nuttig.

## 2.4 Gevoeligheidsanalyse: effecten bij andere ontwikkeling dan in scenario's

### 2.4.1 Wat als de ontwikkeling van elektrolyse (en overige flex) achterblijft?

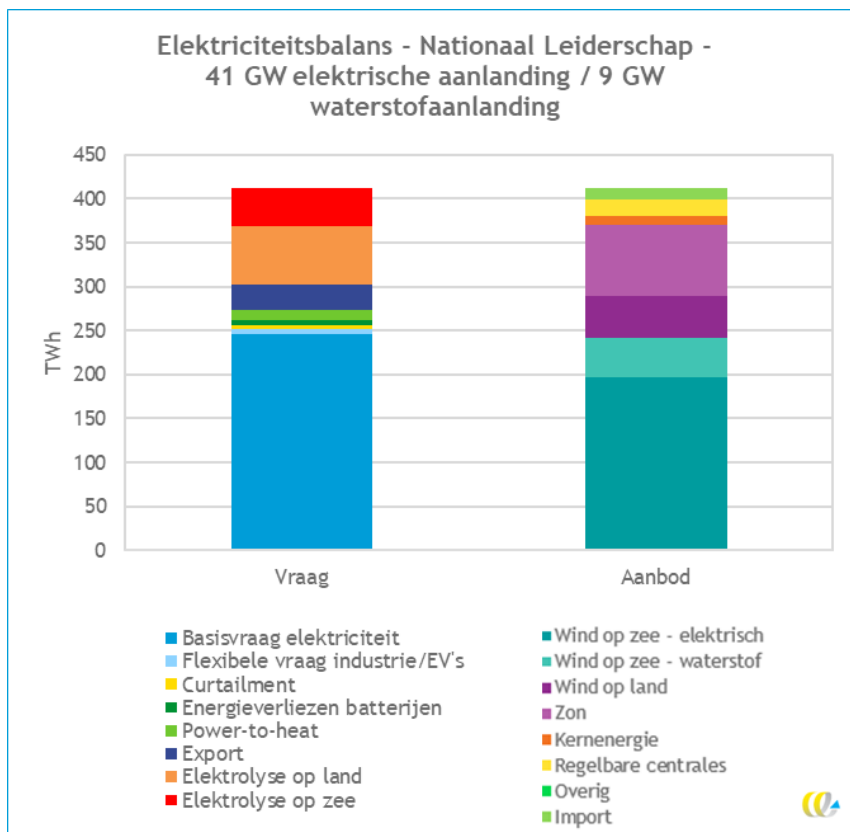
Bovenstaande analyse laat zien dat het geen zekerheid is dat de hoeveelheid elektrolyse die aangenomen is in de scenario's ook daadwerkelijk gerealiseerd wordt. De vraag is wat het betekent voor de inpassing van wind op zee als minder elektrolyse, en ook overige flexibiliteit, gerealiseerd wordt. Hieronder geven we hier een beschouwing op. Eerst gaan we in op de effecten voor de nationale systeembalans en nationale doelstelling voor wind op zee en vervolgens op de effecten op de mogelijkheden voor (elektrische) aanlanding van wind op zee per regio.

#### **Nationale elektriciteitsbalans**

In pVAWOZ, en ook bij het thema Systeemintegratie, wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee onderzocht. Dit komt overeenkom met ongeveer 245 TWh elektriciteit. Daarnaast is er in 2040 ook productie van overige bronnen, zoals zon-PV (90 GW/80 TWh tot 120 GW/105 TWh in scenario's) en wind op land (8,5 GW/28 TWh tot 15 GW/48 TWh in scenario's). Dit betekent dat er voor 2040 een grote hoeveelheid hernieuwbare opwek gepland is (ter referentie, de huidige elektriciteitsvraag is ongeveer 110 TWh). De (directe) elektriciteitsvraag zal door elektrificatie van de huidige processen flink toenemen (225-250 TWh in de twee scenario's voor 2040), maar ligt in de scenario's een stuk lager dan de aangenomen productie van elektriciteit wind op zee en overige bronnen. Het overschot aan productie van elektriciteit kan benut worden met flexibele bronnen, zoals elektrolyse, of kan gecurtailed of geëxporteerd worden.

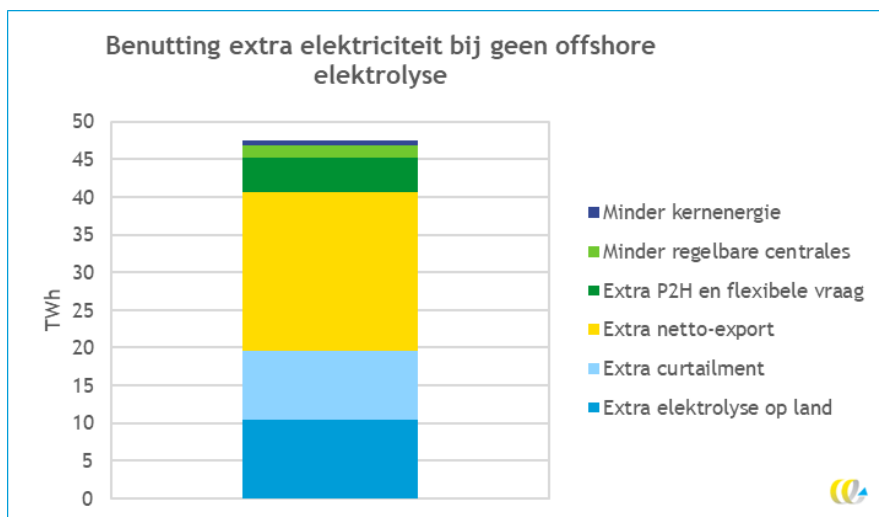
Het uitgangspunt van het Programma VAWOZ is dat 50 GW wind op zee gerealiseerd wordt met circa tien elektrische aanlandingen (41 GW elektrische aanlanding in totaal) en één of twee waterstofaanlandingen tussen 2031 en 2040. Voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie) is deze situatie doorgerekend en is ook een gevoeligheidsanalyse gedaan zonder elektrolyse op zee, dus met 50 GW elektrische aanlanding. De resultaten van deze berekeningen gebruiken we om een inschatting te maken van de effecten op de nationale systeembalans bij achterblijven van de ontwikkeling van elektrolyse en overige bronnen van flexibiliteit.

In het scenario Nationaal Leiderschap is de totale productie van elektriciteit in 2040, inclusief wind op zee, 400 TWh. De basisvraag naar elektriciteit is in dat scenario ongeveer 245 TWh. Daarbovenop komt nog een elektriciteitsvraag van ongeveer 100 TWh van flexibele bronnen, en dan met name van elektrolyse. De onderstaande figuur toont vraag en aanbod van elektriciteit bij 41 GW elektrische aanlanding en 9 GW elektrolyse op zee. In totaal wordt dan 110 TWh elektriciteit omgezet in waterstof met elektrolyse (65 TWh elektrolyse op land, 45 TWh elektrolyse op zee). Daarnaast is er in dat scenario 20 TWh flexibele vraag (flexibele vraag industrie/EV's, power-to-heat en energieverliezen batterijen). Daarnaast wordt ongeveer 5 TWh elektriciteit gecurtailed en is er sprake van netto-export van ongeveer 15 TWh.



*Figuur 2-4 Elektriciteitsbalans bij scenario Nationaal Leiderschap 2040 – 41 GW elektrische aanlanding en 9 GW waterstofaanlanding*

Bij 50 GW elektrische aanlanding, en geen elektrolyse op zee, neemt de flexibele vraag (25 TWh ipv 20 TWh) en elektrolyse op land (75 TWh in plaats van 65 TWh) wat toe. Maar wordt ook meer elektriciteit gecurtaild en geëxporteerd. Dit laat zien dat er onvoldoende vraag is in Nederland om de extra productie van elektriciteit op te vangen.



Figuur 2-5 Benutting extra elektriciteit bij geen offshore elektrolyse

Als de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibele bronnen minder van de grond komt, dan is de binnenlandse vraag naar elektriciteit tot 100 TWh lager en zal er nog een stuk meer overschot van elektriciteit zijn. Dit komt overeen met ruim 20 GW wind op zee. Bij het uitgangspunt van het onderzoek, 50 GW wind op zee in 2040, zullen er dan forse overschotten zijn aan elektriciteit. Een deel van deze overschotten kunnen mogelijk geëxporteerd worden, en daarmee nuttig benut worden in het buitenland. En mogelijk kan er nog extra elektriciteitsvraag gerealiseerd worden. Maar naar verwachting zal in dat geval ook een groot deel van de geproduceerde elektriciteit niet meer benut kunnen worden en gecurtaild moeten worden.

Hetzelfde beeld ontstaat bij het scenario Europese Integratie. In dit scenario is er iets minder vraag naar elektriciteit (225 TWh), maar ook iets minder productie (370 TWh in totaal). De elektriciteitsvraag van elektrolyse en overige bronnen van flexibiliteit ligt in dit scenario ook wat lager (60 TWh in plaats van 100 TWh bij 50 GW elektrische aanlanding), maar is ook hier significant.

Dit betekent dat een scenario met 50 GW wind op zee in 2040 met (vrijwel) geen elektrolyse en overige flexibele bronnen (en de verwachte vraagontwikkeling richting 2040) vanuit systeemintegratie bezien niet efficiënt lijkt.

### **Inpassing per regio**

In algemene zin geldt dat meer elektriciteitsvraag in een regio ervoor zorgt dat meer elektrische aanlandingen ingepast kunnen worden zonder grote ingreep aan het hoogspanningsnet. Dit komt doordat dan een groter deel van de productie van de windparken op zee lokaal gebruikt wordt, en dan minder stroom afgevoerd hoeft te worden (wat bij de regio's voor aanlanding wind op zee het belangrijkste knelpunt is). Ook flexibele elektriciteitsvraag, voornamelijk van elektrolysers maar bijvoorbeeld ook van Power-to-heat, kan hieraan bijdragen. De vraag is of ontwikkeling van flexibele vraag randvoorwaardelijk is voor elektrische aanlanding in een regio, en hoeveel elektrische aanlanding mogelijk is als de ontwikkeling van flexibele vraag achterblijft.

Er zijn voor het bepalen van de impact van elektrische aanlanding op het hoogspanningsnet twee scenario's doorgerekend (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie), met een wisselende hoeveelheid elektrolyse en overige (flexibele) elektriciteitsvraag. Het scenario Europese Integratie heeft minder (flexibele) elektriciteitsvraag en elektrolyse. Het verschil tussen de impact van deze scenario's geeft dus inzicht in de impact van meer (flexibele) elektriciteitsvraag op de inpassing van wind op zee. Daarbij moet wel benoemd worden dat ook aannames over overige ontwikkelingen,

zoals hernieuwbare opwek op land en kernenergie, verschillen tussen beide scenario's. Daardoor is het niet mogelijk om een volledig beeld te geven van de impact van meer of minder flexibele vraag. Wel geven we in de tabel hieronder een globale inschatting van de effecten, per regio. Daarbij geven we aan hoeveel elektrische aanlandingen mogelijk zijn, zonder zware ingrepen aan HS-verbindingen.

*Tabel 2-6 Duiding afhankelijkheid elektrische aanlanding van (flexibele) elektriciteitsvraag, binnen bandbreedte gehanteerde scenario's*

	Nationaal Leiderschap – <b>Veel (flexibele) electriciteitsvraag</b>	Europese Integratie – <b>Minder (flexibele) electriciteitsvraag</b>	<b>Duiding afhankelijkheid (flexibele) electriciteitsvraag</b>
<b>Noord-Holland</b>	Vier aanlandingen mogelijk	Vier aanlandingen mogelijk	Beperkte afhankelijkheid mogelijkheden aanlanding, binnen de bandbreedte van de scenario's
<b>Zuid-Holland</b>	Twee tot drie aanlandingen mogelijk	Eén tot twee aanlandingen	Meer (flexibele) elektriciteitsvraag lijkt extra aanlanding mogelijk te maken. Verschil kan echter ook komen door meer kernenergie bij Europese Integratie.
<b>Zeeland</b>	Twee aanlandingen mogelijk	Twee aanlandingen mogelijk	Beperkte afhankelijkheid mogelijkheden aanlanding, binnen de bandbreedte van de scenario's
<b>Noord-Brabant en Limburg</b>	Vier aanlandingen mogelijk	Vier aanlandingen mogelijk	Beperkte afhankelijkheid mogelijkheden aanlanding, binnen de bandbreedte van de scenario's
<b>Noord-Nederland</b>	Twee aanlandingen mogelijk	Drie aanlandingen mogelijk	Beperkte afhankelijkheid mogelijkheden aanlanding, binnen de bandbreedte van de scenario's. Verschil tussen twee scenario's komt niet door (flexibele) elektriciteitsvraag.
<b>Noord-Brabant en Limburg</b>	Vier aanlandingen mogelijk	Vier aanlandingen mogelijk	Geen afhankelijkheid mogelijkheden aanlanding, binnen de bandbreedte van de scenario's.

Kortom, alleen in Zuid-Holland lijkt in het scenario Nationaal Leiderschap een extra aanlanding mogelijk door meer (flexibele) elektriciteitsvraag (al kan dit ook komen door andere hoeveelheden kernenergie). In de overige regio's lijken bij beide scenario's evenveel elektrische aanlanding mogelijk te zijn. Dat het verschil vooral bij Zuid-Holland optreedt is vermoedelijk het geval omdat de flexibele elektriciteitsvraag en het opgesteld vermogen voor elektrolyse daar het grootst is, en de verschillen tussen beide scenario's (in absolute zin) daarmee ook het grootst. In de andere regio's heeft meer (flexibele) elektriciteitsvraag, van onder meer elektrolyse, naar verwachting wel impact op de lokale absorptie van wind op zee en het verminderen van de netbelasting. Maar is het verschil tussen de twee doorgerekende scenario's niet zo groot dat dit ervoor zorgt dat een extra elektrische aanlanding van 2 GW ingepast kan worden.

Bovenstaande conclusies gelden echter alleen binnen de bandbreedte van de twee doorgerekende scenario's, met één scenario met relatief veel (flexibele) elektriciteitsvraag en één scenario met relatief weinig. Echter, ook het ondergrens scenario qua flexibele elektriciteitsvraag (Europese Integratie) gaat uit van een stuk meer flexibele elektriciteitsvraag en elektrolyse dan de huidige situatie. In de Startanalyse Systeemintegratie is een inschatting gemaakt hoeveel elektrische verbindingen inpasbaar zijn als er helemaal geen bronnen van flexibele elektriciteitsvraag gerealiseerd worden. Uit die analyses volgt dat dan in alle regio's één tot twee aanlandingen minder mogelijk is, behalve in Noord-Brabant en Limburg. Dit betekent dat dan in Zeeland, Zuid-Holland en Noord-Nederland mogelijk geen elektrische aanlandingen meer inpasbaar zijn, zonder zware ingrepen aan HS-verbindingen. In Noord-Holland, Noord-Brabant en Limburg lijken dan nog wel elektrische aanlandingen inpasbaar. Bij deze conclusies moet echter wel benoemd worden dat

zonder flexibele elektriciteitsvraag ook een stuk minder wind op zee in Nederland noodzakelijk lijkt te zijn, omdat dit ook een significant deel van de totale vraag is (zie vorige paragraaf).

Als de ontwikkeling van elektrolyse achterblijft, dan kan ook andere (flexibele) vraag gerealiseerd worden om alsnog elektrische verbindingen in te kunnen passen. In de industriële clusters kan power-to-heat van de industrie (met elektrische boilers) en vraagsturing van de industrie hieraan bijdragen. Uit Figuur 2-2 blijkt dat met name power-to-heat een significante impact kan hebben. Ook lange-termijn opslag van elektriciteit, bijvoorbeeld met CAES in Noord-Nederland, kan mogelijk een optie zijn. Korte-termijn opslag zal naar verwachting weinig impact hebben.

Naast flexibele vraag kan ook meer basisvraag naar elektriciteit ertoe leiden dat meer elektrische aansluitingen ingepast kunnen worden, aangezien dan ook meer elektriciteit lokaal benut wordt. Het moet wel grootschalige elektriciteitsvraag (orde grootte GW) zijn om significante impact te hebben. Dit kan door meer elektrificatie bij de bestaande industrie (ten opzichte van de doorgerekende scenario's), het aantrekken van nieuwe industrie, of bijvoorbeeld in Noord-Nederland en Noord-Holland door het realiseren van nieuwe grootschalige datacenters.

#### **2.4.2 Wat als meer flexibiliteit en/of elektrolyse wordt gerealiseerd?**

In de voorgaande paragraaf hebben we een beschouwing gegeven op de effecten als de ontwikkeling van elektrolyse en overige flexibiliteitsbronnen achterblijft, ten opzichte van de scenario's die de basis zijn voor de beoordeling Systeemintegratie. Maar het is ook mogelijk dat meer elektrolyse en overige flexibiliteitsbronnen gerealiseerd worden dan in deze scenario's, ofwel op regionaal niveau en/of op nationaal niveau. Zo is in verschillende CES's een hogere ambitie opgenomen dan de bovengrens van de scenario's die wij hanteren. Dan is echter wel een forse toename en versnelling van de uitrol van elektrolyse nodig, aangezien voorgaande paragrafen lieten zien dat de huidige (concrete) plannen achterblijven bij de aannames in de scenario's.

Extra elektrolyse of overige flexibiliteit zorgt ervoor dat meer aangelande windstroom vanaf de Noordzee nabij de aansluitlocaties direct benut kan worden. Dit kan de belasting op de hoogspanningsverbindingen, op momenten waarop windstroom afgevoerd wordt, verlichten. Het is de verwachting dat bij meer elektrolyse of overige flexibiliteit in ieder geval evenveel aansluiting per regio mogelijk is (als wat uit de analyses volgt), aangezien de grootste knelpunten op de hoogspanningsverbindingen bij de aansluitregio's op de momenten met afvoer van windstroom verwacht worden. Mogelijk is er bij een grotere hoeveelheid elektrolyse of overige flexibiliteit nog meer elektrische aansluiting nodig in sommige regio's, maar dit is afhankelijk van het vermogen en de wijze van inzet.

Bij realisatie van meer elektrolyse of overige flexibiliteitsbronnen neemt het risico toe dat extra knelpunten op het hoogspanningsnet ontstaan door afname van stroom op momenten bij lokale tekorten.

#### **2.4.3 Beschouwing op impact inzet elektrolyzers**

De manier waarop elektrolyzers ingezet worden heeft effect op de netimpact van deze elektrolyzers. Als elektrolyzers het hele jaar door draaien (vullast), dan zullen ze een andere impact hebben dan wanneer deze alleen draaien op momenten waarop windmolens op de Noordzee draaien. Voorlopig, in ieder geval tot aan de eerste jaren van de jaren '30, zijn de eisen voor groene waterstof vanuit de RED III en de Delegated Act bepalend voor de manier waarop elektrolyzers ingezet kunnen worden. Om aan deze eisen te voldoen, met zoveel mogelijk vullasturen, verwachten we dat de meeste exploitanten van elektrolyzers een PPA (afpraak tussen twee marktpartijen over het kopen van elektriciteit) sluiten met een exploitant van wind op zee, eventueel aangevuld met een PPA voor zon-pv. Richting 2040 verwachten we dat meer dan 90% van de productie van elektriciteit in

Nederland van hernieuwbare bronnen komt. Daarmee wordt alle met elektriciteit geproduceerde waterstof als groen gezien volgens de EU-eisen. De inzet van elektrolyzers wordt dan volledig bepaald door economische afwegingen. Elektrolyzers zullen dan op alle uren met lage elektriciteitsprijzen ingezet worden, wat in 2040 vaak zal voorkomen. Op uren met hoge elektriciteitsprijzen, als bijvoorbeeld waterstofcentrales draaien, zal het naar verwachting niet rendabel zijn om een elektrolyser te laten draaien.

Zoals eerder besproken hebben elektrolyzers op twee manieren impact op de netbelasting bij aansluitlocaties van wind op zee:

- Verlagen belasting door afnemen stroom bij lokale overschotten wind op zee;
- Verhogen belasting door afnemen stroom bij lokale tekorten (op momenten met weinig wind op zee).

We verwachten dat zowel in de eerste jaren van de jaren '30 (waarin de eisen vanuit de REDIII bepalend zijn voor de inzet) als richting 2040 (wanneer er geen aanvullende eisen zijn en elektrolyzers economisch optimaal ingezet worden) er een sterke correlatie is tussen de productie van windparken op zee en de inzet van elektrolyzers<sup>7</sup>. Dit betekent dat elektrolyzers met de verwachte inzet naar verwachting grotendeels overschotten van wind op zee zullen opvangen bij de aansluitlocaties, en dus in het doel zullen voorzien

We zien twee mogelijke knelpunten bij de inzet van elektrolyzers, met relatie tot de netbelasting op het hoogspanningsnet en de efficiënte inpassing van wind op zee in het systeem:

- We verwachten dat elektrolyzers een deel van het jaar de netbelasting zullen verhogen, als ze ingezet worden op momenten met weinig wind op zee (en dus lokale tekorten). Dit kan bijvoorbeeld op momenten met veel productie van zon-PV het geval zijn, ook omdat de prijzen dan laag zijn. Als een elektrolyser vollast draait, bijvoorbeeld omdat hij gekoppeld is aan industriële waterstofvraag, zal dit vaker het geval zijn. Bij grotere vermogens aan elektrolyse, en met name in gebieden met veel industriële elektriciteitsvraag (Noord-Holland Zuid, Zuid-Holland en Zeeland), kan dit leiden tot nieuwe knelpunten op de hoogspanningsverbindingen door afname. Deze nieuwe knelpunten kunnen voorkomen worden door elektrolyzers aan te sluiten met alternatieve transportrecht contracten, zoals het tijdsduurgebonden transportrecht, de ATR85 (Netbeheer Nederland, 2024).
- We verwachten dat er uren zullen zijn met lokale overschotten waarop elektrolyzers niet aanstaan, doordat de elektriciteitsprijzen hoog zijn. Op die uren kunnen knelpunten op de HS-verbindingen ontstaan die dan niet opgelost worden inzet van elektrolyzers. Dit is niet oplosbaar met alternatieve transportrechten, aangezien extra inzet van elektrolyzers (of overige bronnen van flexibiliteit) nodig is. Wel kan TenneT een vergoeding betalen aan elektrolyzers voor extra inzet op die uren (redispatch).

## 2.5 Overige relevante aspecten rondom flexibiliteit en elektrolyse

### 2.5.1 Nut en noodzaak elektrolyzers in Brabant en Limburg

Elektrolyzers kunnen bij aansluitlocaties aan de kust bijdragen aan de inpassing van wind op zee. De situatie is bij diepe aanlanding (bij Tilburg en in Limburg) echter anders. We verwachten dat grootschalige elektrolyse bij diepe aanlanding, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk is en niet zal bijdragen aan het verminderen van belasting op de hoogspanningsverbindingen. Het is naar verwachting efficiënter om de aangelande windstroom in

---

<sup>7</sup> Omdat elektrolyzers naar verwachting PPA's zullen afsluiten met windparken op zee, maar ook omdat de elektriciteitsprijzen op de day-ahead markt laag zullen zijn met veel productie van wind op zee.

Limburg en Tilburg door te voeren richting andere delen van Nederland of te exporteren richting België en Duitsland, en op andere locaties in Nederland (aan de kust) grootschalige elektrolyse toe te passen (en de benodigde waterstof via het waterstofnetwerk naar Tilburg en Limburg te transporteren)<sup>8</sup>.

Vanwege bovenstaande redenen verwachten we dat grootschalige elektrolyse bij elektrische aanlanding in Tilburg en/of Limburg, vanuit het perspectief van systeemintegratie, niet noodzakelijk en wenselijk is.

Voor Moerdijk en Geertruidenberg is grootschalige elektrolyse bij elektrische aanlanding wel noodzakelijk en wenselijk. Dit komt doordat deze locaties dichterbij de kust liggen en beide bovenstaande argumenten (efficiënter om elektriciteit door te voeren richting andere gebieden en hoge kosten diepe aanlanding) voor deze locaties minder gelden.

## 2.5.2 Aansluiten elektrolyse en wind op zee

Binnen het programma VAWOZ wordt gezocht naar locaties voor het aansluiten van grootschalige elektrolyzers. Binnen de regio kunnen elektrolyzers op verschillende stations aangesloten worden. Elektrolyzers worden idealiter op hetzelfde station aangesloten als waar de elektrische verbinding ook aangesloten wordt. Het realiseren van grootschalige elektrolyse bij stations waar in de huidige routekaart al aanlanding van wind op zee gepland staat is, vanuit het perspectief van systeemintegratie, ook gunstig. Het realiseren van grootschalige elektrolyse op een ander station binnen de regio, waar geen wind op zee aangesloten wordt, is minder wenselijk. Dan is er extra transport nodig tussen de aansluitlocatie van de elektrische verbinding en de elektrolyser, waardoor mogelijk meer uitbreidingen aan het elektriciteitsnet nodig zijn.

Bij de locatiekeuzes voor elektrolyse binnen een regio is daarnaast de aansluitcapaciteit van de stations van belang. Per station is al een inschatting gemaakt of het aansluiten van grootschalige elektrolyse mogelijk is. Deze inschatting is opgenomen in het hoofdrapport Systeemintegratie, bij de beoordeling voor de elektrolyzers.

# 3 Nationale systeemkeuzes wind op zee

## 3.1 Samenvatting

Binnen de beoordeling systeemintegratie van het Programma VAWOZ ligt de focus op de optimale inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur. Maar bij systeemintegratie van wind op zee zijn ook overkoepelende systeemkeuzes rondom wind op zee. Deze systeemkeuzes worden in andere beleidsdocumenten, zoals het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN), het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) behandeld. Echter, de nationale systeemkeuzes hebben wel impact op de inpassing in de energie-infrastructuur.

Bij deze analyses is gekeken naar de effecten van verschillende systeemkeuzes:

- **Hoeveelheid wind op zee en verhouding elektrische verbinding en waterstofverbindingen.** Er kunnen grote hoeveelheden elektriciteit geproduceerd worden met windparken op zee. De

---

<sup>8</sup> Het is daarnaast erg kostbaar om diepe aanlanding te realiseren. Dat roept de vraag op of het kosteneffectief is om elektriciteit van windparken op zee naar het binnenland te transporteren en vervolgens daar om te zetten in waterstof. Als de elektriciteit niet lokaal benut kan worden, of geëxporteerd kan worden, dan is het naar verwachting kosteneffectiever om minder diepe aanlandingen te realiseren.

keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040. In het Programma VAWOZ wordt uitgegaan van circa 10 elektrische verbindingen (circa 20 GW) en één of twee waterstofverbindingen voor de periode 2031-2040.

- **Hybride aansluitingen of radiale aansluitingen.** Na 2030 is het voor windgebied 6/7 een mogelijkheid om hybride aansluitingen te realiseren waarbij meerdere kabels op zee samenkomen bij een energiehub waar vervolgens elektrolyse toegepast wordt. Vanaf deze energiehub wordt vervolgens elektriciteit en waterstof richting de kust getransporteerd. Bij dit concept wordt ook wel gesproken van hybride aansluitingen.
- **Overplanting: meer windmolens op dezelfde kabel.** In dit geval wordt het windvermogen ontsloten met minder kabels (bijvoorbeeld 3 GW windmolens op 2 GW kabels).

Hierbij ligt de primaire focus op de impact van deze nationale systeemkeuzes op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem op land, en dan concreet de vraag of deze keuzes effect hebben op de hoeveelheid aanlanding die per regio inpasbaar zijn. De belangrijkste conclusies daarvan zijn:

- Hybride aansluitingen en overplanting hebben invloed op de hoeveelheid elektriciteit die per kabel vanaf zee naar land getransporteerd wordt, wat effect heeft op het transport van elektriciteit via de HS-verbindingen rondom de aansluitlocaties, en daarmee potentieel op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast kan worden. We verwachten echter dat de impact op het aantal elektrische verbindingen dat ingepast kan worden per regio beperkt is, aangezien er vooral meer elektriciteit naar land gebracht wordt op uren met weinig productie van wind op zee en het piekvermogen voor invoeding gelijk blijft. Het is wel mogelijk dat er iets meer uren met overschrijding ontstaan, bijvoorbeeld op uren met relatief weinig wind op de Noordzee maar ook weinig (flexibele) vraag.
- Alle drie de systeemkeuzes kunnen ervoor zorgen dat minder elektrische verbindingen gerealiseerd en ingepast hoeven te worden. In dat geval wordt de opgave voor inpassing van wind op zee minder uitdagend.
- Dit betekent dat deze systeemkeuzes ervoor kunnen zorgen dat wind op zee makkelijker ingepast kan worden, aangezien het effect op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast naar verwachting beperkt is en er in totaal minder elektrische verbindingen nodig zijn. Zo kan potentieel een groter vermogen aan windmolens ingepast worden, zonder forse uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur.

Naast de impact van de systeemkeuzes op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem op land hebben we ook een inschatting gemaakt van de impact van de systeemkeuzes op de nationale balans van vraag en aanbod en op de benutting van de windenergie. Dit geeft een globaal inzicht in de effecten van deze keuzes en de afwegingen. Echter, om hier keuzes over te maken is een integrale afweging nodig waarbij ook naar aspecten als ruimte, milieu, tijdige haalbaarheid, internationale concurrentie en strategische autonomie gekeken moet worden.

## 3.2 Inleiding

Onder systeemintegratie verstaan we de inpassing van wind op zee in het energiesysteem. Het gaat specifiek om de technische en energetische inpassing. Zaken zoals kosten, ruimte en milieu zijn belangrijk voor een maatschappelijk optimale inpassing van wind op zee, maar vallen niet onder systeemintegratie. Deze thema's worden apart onderzocht.

Maar alsnog heeft systeemintegratie een brede definitie. Daarom maken we verder onderscheid naar de verschillende aspecten die bij de inpassing van wind op zee in het energiesysteem van belang zijn. Grofweg zijn er drie aspecten van belang bij systeemintegratie van wind op zee:

- **Nationale systeemkeuzes voor wind op zee.** Dit gaat over de vormgeving van het totale energiesysteem en inpassing van wind op zee hierin. Relevante systeemkeuzes zijn:
  - *Benutting windenergie.* Er kunnen grote hoeveelheden elektriciteit geproduceerd worden met windparken op zee. De keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040.
  - *Systeemontwerp Noordzee.* Er zijn verschillende keuzes die gemaakt moeten worden over het systeemontwerp voor de Noordzee. Deze keuzes worden gemaakt in het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN). In dit onderzoek bespreken we de belangrijkste keuzes en afwegingen.
- **Optimale inpassing energie-infrastructuur.** De energie van windparken op zee moet naar land getransporteerd worden en daar vervolgens met de infrastructuur op land doorgevoerd worden richting eindgebruikers. Dit geldt zowel voor elektrische aansluitingen als waterstofverbindingen. De windenergie kan op verschillende aansluitlocaties aangesloten worden op de energie-infrastructuur op land. Een efficiënte verdeling van wind op zee over de verschillende aanlandlocaties is noodzakelijk om de impact op de energie-infrastructuur op land te minimaliseren.
- **Samenhang met overige ontwikkelingen energiesysteem.** Bij beide aspecten is de samenhang met overige ontwikkelingen van het energiesysteem van belang. De ontwikkeling van de energievraag, overige productiebronnen, flexibele bronnen en ontwikkelingen in het buitenland hebben impact op hoe wind op zee optimaal ingepast kan worden.

Binnen de beoordeling systeemintegratie van het Programma VAWOZ ligt de focus op het tweede aspect, de optimale inpassing van wind op zee in de energie-infrastructuur. De nationale systeemkeuzes worden in andere beleidsdocumenten, zoals het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN), het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) onderzocht. Echter, de nationale systeemkeuzes hebben wel impact op de inpassing in de energie-infrastructuur.

Daarom gaan we in deze bijlage in op de belangrijkste nationale systeemkeuzes rondom wind op zee. Het doel hiervan is het bepalen van de impact van deze keuzes op de keuzes voor aanlanding van wind op zee.

We onderzoeken de effecten van verschillende type systeemkeuzes:

- **Verhouding elektrische verbindingen en waterstofverbindingen.** Er kunnen grote hoeveelheden elektriciteit geproduceerd worden met windparken op zee. De keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040. In het Programma VAWOZ wordt maximaal 50 GW wind op zee met circa 10 elektrische verbindingen (circa 20 GW) en één of twee waterstofverbindingen voor de periode 2031-2040 onderzocht.
- **Hybride aansluitingen of radiale aansluitingen.** Na 2030 is het voor windgebied 6/7 een mogelijkheid om hybride aansluitingen te realiseren waarbij meerdere kabels op zee samenkomen bij een energiehub waar vervolgens elektrolyse toegepast wordt. Vanaf deze energiehub wordt vervolgens elektriciteit en waterstof richting de kust getransporteerd. Bij dit concept wordt ook wel gesproken van hybride aansluitingen.
- **Overplanting: meer windmolens op dezelfde kabel.** In dit geval wordt het windvermogen ontsloten met minder kabels (bijvoorbeeld 3 GW windmolens op 2 GW kabels). Het voordeel hiervan is dat kosten voor dure elektriciteitsinfrastructuur op zee uitgespaard worden, maar de consequentie is wel dat een deel van de stroom niet naar land gebracht kan worden en verloren gaat.

Voor deze systeemkeuzes kijken we naar de volgende aspecten:

- Impact van deze systeemkeuzes op de nationale energiebalans (vraag en aanbod), om een globaal gevoel te geven van de effecten op het hele energiesysteem. Dit doen we alleen voor hybride aansluitingen en overplanting.
- Impact van bepaalde nationale systeemkeuzes (bv offshore curtailment of hybride aansluitingen) op inpassing WoZ op energiesysteem op land. Concreet: inschatting of dit effect heeft op hoeveel aanlandingen per regio inpasbaar zijn.

Het gaat hierbij om versimpelde analyses om globaal inzicht te geven in de effecten van systeemkeuzes en de impact op de bevindingen van de IEA van het Programma VAWOZ in te schatten. Uiteindelijk zijn uitgebreidere analyses, waarin ook verder gekeken wordt dan alleen energetische effecten, noodzakelijk om een goede afweging te maken voor deze keuzes. In de onderstaande paragraaf bespreken we welke inzichten de analyses in deze bijlage wel geven, en welke niet.

### 3.2.1 Welke inzichten geeft deze analyse wel, en welke inzichten juist niet?

Waar kijken we wel naar?

- Impact van bepaalde nationale systeemkeuzes (bv offshore curtailment of hybride aansluitingen) op inpassing WoZ op energiesysteem op land. Concreet: inschatting of dit effect heeft op hoeveel aanlandingen per regio inpasbaar zijn
- Impact van deze systeemkeuzes op de nationale energiebalans (vraag en aanbod), om een globaal gevoel te geven van de effecten op het hele energiesysteem
- Bovenstaande analyses met de onderzoeksopgave van pVAWOZ (50 GW wind op zee in totaal, met 10 elektrische verbindingen en 1 of 2 waterstofverbindingen) als basis, en daarop enkele variaties.

Welke inzichten geven de analyses niet?

- Impact op totale systeemkosten energiesysteem (uiteindelijk voor de afweging cruciaal vermoedelijk)
- Optimalisaties binnen deze systeemkeuzes (hoeveel GW wind per GW kabel doe je dan, welk vermogen aan GW wind op zee en welke verhouding E/H<sub>2</sub> is optimaal bij bepaalde vraagontwikkeling). We rekenen nu alleen enkele illustratieve opties door, die ook geënt zijn op de onderzoeksopgave van pVAWOZ
- Interactie met andere productiebronnen. In onze analyses voor pVAWOZ variëren we alleen wind op zee, maar houden we de aannames voor wind op land, zon en kernenergie gelijk. In de praktijk zal je integraal naar deze keuzes willen kijken, en bv ook minder wind op land doen als je meer elektrische aanlanding van wind op zee realiseert.

### 3.3 Aanpak

Voor de systeemkeuzes maken we een inschatting van de effecten op de nationale balans van vraag en aanbod van elektriciteit en bepalen we hoe de windenergie op zee benut wordt. Dit doen we voor twee scenario's van ii3050, namelijk Nationaal Leiderschap en Europese Integratie. Voor de nationale balans van vraag en aanbod rekenen we vraag en aanbod van elektriciteit op uurbasis door. Daarbij variëren we alleen het aanbod van wind op zee, het overige aanbod en de vraag naar elektriciteit houden we gelijk. Vervolgens bepalen we de overschotten en tekorten van elektriciteit. De overschotten en tekorten worden ingevuld met verschillende flexibiliteitsbronnen en import/export van elektriciteit. Vraagsturing en opslag kunnen zowel tekorten als overschotten invullen, voor het invullen van tekorten kunnen waterstofcentrales, kerncentrales en import toegepast worden en de overschotten kunnen benut worden met onder meer elektrolyse, power-to-

heat en export en deze overschotten zullen deels gecurtailed worden. In deze analyse doen we geen uitspraak over welke bronnen welk deel van de tekorten en overschotten invullen<sup>9</sup>.

Naast de impact van wind op zee op de nationale tekorten en overschotten van elektriciteit bepalen we ook hoe de wind op zee in de zichtperiode van pVAWOZ benut wordt. Daarbij geven we aan welk deel offshore omgezet wordt in waterstof, welk deel direct benut wordt voor het invullen van de elektriciteitsvraag, welk deel leidt tot extra overschotten op land en (bij overplanting) welk deel offshore gecurtailed wordt. Dit gebeurt op basis van dezelfde doorrekening van uurlijkse vraag en aanbod. De benutting bepalen we ten opzichte van de situatie zonder extra windparken op zee na realisatie van de routekaart windenergie op zee 21 GW, en gaat dus om de marginale situatie.

Tot slot bepalen we voor de verschillende systeemkeuzes wat het effect is op de impact op het hoogspanningsnet op land en daarmee de mogelijkheden voor aanlanding van wind op zee binnen de regio's. Dit is een kwalitatieve beschouwing op basis van expert judgement.

### 3.4 Resultaten

Hieronder bespreken we de resultaten voor de drie systeemkeuzes:

- Verhouding elektrische verbindingen en waterstofverbindingen.
- Hybride aansluitingen of radiale aansluitingen.
- Overplanting: meer windmolens op dezelfde kabel.

#### **Resultaten geldig binnen de kaders van de doorgerekende scenario's**

Onderstaande analyses zijn uitgevoerd voor twee scenario's voor 2040, namelijk de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, waarbij we alleen het aanbod van wind op zee gevarieerd hebben. In deze scenario's zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling van de energievraag en (overige) productie. De benutting van de wind op zee en de tekorten en overschotten van elektriciteit zijn afhankelijk van de verhouding tussen vraag en aanbod, en daarmee afhankelijk van het scenario. Dit betekent dat de resultaten afhankelijk zijn van de aannames binnen de scenario's en alleen geldig zijn binnen de kaders van die scenario's. We verwachten echter dat de grote lijnen, zoals dat een groot deel van de wind op zee na 2031 tot extra overschotten leidt en de impact van hybride aansluitingen en overplanting, ook bij een andere ontwikkeling van vraag en aanbod zullen blijven staan.

Naast deze scenario's zijn voor de netimpact van wind op zee ook nog verschillende gevoeligheidsanalyses gedaan met meer kerncentrales. Dat is niet meegenomen in de analyses in deze bijlage.

#### **3.4.1 Hoeveelheid wind op zee en verhouding elektrische verbindingen en waterstofverbindingen**

In pVAWOZ wordt de inpassing van maximaal 50 GW wind op zee in 2040, met 10 elektrische verbindingen en één of twee waterstofverbindingen in de periode 2031-2040, onderzocht. Het realiseren van maximaal 50 GW wind op zee in 2040 is het uitgangspunt van het onderzoek, maar de ontwikkelingen in de komende jaren moeten bepalen hoeveel wind op zee gerealiseerd kan worden en noodzakelijk is.

De windparken uit de huidige routekaart windenergie op zee 21 GW worden met kabels aangesloten op het elektriciteitssysteem op land en de geproduceerde energie wordt dus als elektriciteit naar

<sup>9</sup> Met uitzondering van scenario's die door de netbeheerders doorgerekend zijn. In die scenario's is op basis van aannames en marktanalyses een inschatting gemaakt van de onderlinge concurrentiepositie en inzet van verschillende bronnen van flexibiliteit.

land gebracht en (grotendeels) als elektriciteit benut. Maar bij realisatie van 50 GW wind op zee is de productie van windparken op zee groter dan de toekomstige binnenlandse (directe) elektriciteitsvraag. Er zijn verschillende mogelijkheden om de overige elektriciteit uit de windparken op zee nuttig aan te wenden. De belangrijkste opties zijn elektriciteit door voeren richting het buitenland en elektriciteit om te zetten naar waterstof met elektrolyzers op land of op zee.

De keuzes rondom de benutting van windenergie, en de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit en (binnenlands geproduceerd) waterstof, bepalen hoeveel wind op zee wenselijk is in 2040 en welk deel van de windenergie idealiter als elektriciteit naar land gebracht wordt en welk deel op zee omgezet wordt naar waterstof. De belangrijkste factoren hierbij zijn:

- **Ontwikkeling energievraag.** Voor het behalen van de klimaatdoelen is elektrificatie noodzakelijk, wat leidt tot een forse toename van de vraag naar elektriciteit en waterstof. Het gaat hierbij ook om flexibele energievraag, bijvoorbeeld van elektrolyzers en power-to-heat (meer hierover in hoofdstuk 2).  
De ontwikkeling van de energievraag is op twee manieren cruciaal voor de uitrol van wind op zee. Extra ontwikkeling van met name elektriciteitsvraag is noodzakelijk om wind op zee te kunnen inpassen in de energie-infrastructuur op land (**haalbaarheid**). Maar als de elektrificatie niet tot stand komt is er ook geen afzetmarkt voor de windparken op zee en is minder wind op zee noodzakelijk (**doel**).  
Bij de vraagontwikkeling is, met name voor waterstof, ook van belang dat er vraag is naar binnenlandse productie is van deze energiedragers en dat dit kan concurreren met import.
- **Verhouding tot het buitenland en zelfvoorzienendheid.** Hierbij zijn twee aspecten van belang: wil Nederland zoveel mogelijk energie zelf produceren en kan dit ook concurreren met import (met name relevant voor waterstof) en wil Nederland ook energie produceren voor export (met name relevant voor elektriciteit). Dit bepaalt, naast de binnenlandse vraag, hoe groot de behoefte is aan productie van energie in Nederland.
- **Ontwikkeling overige productiebronnen.** Overige productiebronnen, zoals hernieuwbare opwek op land en kernenergie, vullen ook een deel van de binnenlandse energievraag in. Dit bepaalt ook hoeveel vraag er nog is voor elektriciteit van windparken op zee.
- **Maatschappelijke kosten.** De vraag naar elektriciteit en waterstof, het aanbod van andere bronnen (zoals opwek op land en kernenergie) en de kosten voor energie-infrastructuur op zee bepalen welke verhouding tussen elektrische aanlanding en waterstofaanlanding tot de laagste maatschappelijke kosten leidt. Voor de maatschappelijke kosten zijn onder meer energie-efficiëntie, de kosten van de energie-infrastructuur en de kosten van productie relevant.
- **Effecten milieu en ruimte.** Er zit een verschil in de ruimtelijke en milieu impact, en de ruimtelijke mogelijkheden, van elektrische verbindingen en waterstofverbindingen. Dit kan ook een afweging zijn om voor een andere verhouding te kiezen. Daarnaast kunnen ruimtelijk en milieutechnische beperkingen ertoe leiden dat bepaalde routes voor elektrische verbindingen of waterstofverbindingen niet (tijdig) gerealiseerd kunnen worden. Meer over de effecten van de aanlandingen op milieu en ruimte is te vinden in de beoordeling *Milieu en Ruimte*.
- **Tijdige realisatie.** Realisatie van maximaal 50 GW wind op zee in 2040, het uitgangspunt van het onderzoek, is ambitieus en vereist een hoog tempo voor de uitrol van de windparken op zee en de energie-infrastructuur op zee, energie-infrastructuur op land en de ontwikkeling van de energievraag.

### Impact op mogelijkheden elektrische aanlanding binnen regio's

Hieronder bespreken we de effecten van een andere verhouding op de netimpact van wind op zee, en daarmee op de mogelijkheden voor aanlanding van wind op zee binnen de regio's. Hiervoor is van

belang hoeveel elektrische verbindingen richting land gerealiseerd worden. We bespreken hieronder de effecten bij meer elektrische verbindingen (15 in plaats van 10) en bij minder (5 in plaats van 10).

### ***Volledige elektrische aanlanding***

TenneT heeft een integrale netdoorrekening gemaakt om de effecten op het HS-net bij 15 elektrische aanlandingen van 2 GW na 2031, en in totaal daarmee 50 GW elektrische aanlanding, in te schatten. Deze gevoeligheidsanalyse is uitgewerkt voor het (basis-)scenario Nationaal Leiderschap.

Bij meer elektrische aanlanding verandert het hele energiesysteem, aangezien het energiesysteem in balans moet zijn en het extra aanbod van elektriciteit ook ergens benut moet worden (of curtailment toegepast moet worden). Daarom is een nieuw energetisch scenario opgesteld. De basisvraag naar elektriciteit en waterstof en de productie van overige energiebronnen is gelijk gehouden ten opzichte van het scenario met 10 elektrische aanlandingen. Maar er is wel een nieuwe inschatting gemaakt van de inzet van flexibiliteit, zoals flexibele vraag van elektrolyzers op land, import/export, opslag en curtailment. Hiervoor is de modellering van ii3050 gebruikt.

Bij de doorrekening van de 15 elektrische aanlandingen gaan we uit van een, vanuit het perspectief van systeemintegratie, gunstige verdeling aangezien dit naar verwachting noodzakelijk is om 15 elektrische verbindingen te kunnen realiseren. Daarbij is gekozen voor een configuratie die naar verwachting tot zo min mogelijk knelpunten op het hoogspanningsnet op land leidt. De doorgerekende configuratie lijkt op de configuratie Ruimtelijke Optimalisatie, maar dan met 5 extra elektrische aanlandingen. Daarom vergelijken we de resultaten van de doorrekening met 15 elektrische aanlandingen met de resultaten van de configuratie Ruimtelijke Optimalisatie.

De belangrijkste conclusies over de impact van 15 elektrische verbindingen op het HS-net zijn:

- Bij 15 elektrische aanlandingen zijn bij extra 380kV-verbindingen grote ingrepen noodzakelijk. Dit heeft twee oorzaken:
  - Elke regio heeft een maximale hoeveelheid aanlanding die mogelijk is voordat ingrepen bij de 380kV-verbindingen in de regio noodzakelijk zijn. Bij 15 elektrische aanlandingen is het niet mogelijk om binnen die grenzen te blijven voor alle regio's.
  - Er is ook meer belasting op de 380kV-verbindingen in het binnenland, onder meer door meer export.
- We gaan uit van een, vanuit systeemintegratie, 'optimale' verdeling van de elektrische aanlandingen over de verschillende regio's. Bij een minder optimale verdeling zullen nog meer ingrepen nodig zijn aan de HS-verbindingen nodig zijn bij 15 elektrische verbindingen.
- In de doorrekeningen is aangenomen dat extra elektrische aanlanding leidt tot extra flexibele vraag naar elektriciteit, ook binnen de regio's. Dit dempt een deel van de effecten van het extra aanbod van elektriciteit. Dit strookt met hoe we verwachten dat dit in de praktijk ook zal uitpakken.
- Bij 15 elektrische aanlandingen is ook meer aansluitcapaciteit noodzakelijk bij HS-stations. Naar verwachting is er voldoende capaciteit beschikbaar bij alle stations om (deels met uitbreidingen binnen het station) 15 elektrische aanlandingen aan te kunnen sluiten.

### ***Minder elektrische aanlanding***

Er is geen separate netdoorrekening gemaakt door TenneT en/of Gasunie voor de situatie met minder wind op zee in 2040, maar we hebben hiervoor wel een kwalitatieve inschatting gemaakt. De belangrijkste effecten bij minder elektrische verbindingen zijn naar verwachting:

- Als er minder dan 50 GW wind op zee gerealiseerd wordt, dan leidt dit tot minder elektrische aanlanding en/of minder waterstofaanlanding. De exacte impact op de energie-infrastructuur is afhankelijk van of van de verhouding elektrische aanlanding en waterstofaanlanding.
- Bij minder elektrische aanlanding is er minder impact op de HS-verbindingen. Dit betekent dat er mogelijk minder ingrepen nodig zijn en dat het minder impact heeft als aanlanding in bepaalde regio's niet mogelijk is, in vergelijking met 10 elektrische aanlandingen.
- Minder elektrische aanlanding leidt tot minder export en mogelijk minder elektriciteitsvraag van flexibele bronnen. Dit kan komen doordat er minder flexibele bronnen, zoals elektrolyzers, gerealiseerd worden of doordat deze bronnen minder draaiuren maken. Als er minder flexibele vraag is, dan kan dit ervoor zorgen dat minder elektrische aanlandingen inpasbaar zijn per regio (meer hierover in hoofdstuk 2)
- Bij minder waterstofaanlanding is er ook minder impact op het waterstofnetwerk. Bij minder waterstofaanlanding is wel meer waterstofimport nodig. Dit zal naar verwachting op locaties gerealiseerd worden die ook onderzocht worden voor waterstofaanlanding, wat een deel van het effect van minder waterstofaanlanding opheft.
- Bij minder dan 50 GW wind op zee zijn er in totaal dus naar verwachting minder ingrepen nodig aan de energie-infrastructuur. Maar dan is er uiteraard ook minder hernieuwbare energie beschikbaar, waardoor de CO<sub>2</sub>-reductiedoelen lastiger te halen zijn.

### 3.4.2 Hybride aansluitingen (ook wel energie-hubs of hub-and-spoke)

TenneT heeft voor aansluiting van windparken op zee standaardconcepten ontwikkeld voor zowel HVAC- als HVDC-aansluitingen op platforms (TenneT, 2022). Vanaf deze platforms worden elektrische verbindingen richting de kust aangelegd. Dit zijn zogeheten radiale aansluitingen. Ook voor aanlanding van waterstof zijn radiale aansluitingen mogelijk. In dat geval wordt de volledige productie van een windpark omgezet in waterstof met offshore elektrolyse en wordt deze waterstof middels een waterstofleiding richting de kust getransporteerd.

in de verdere toekomst is het mogelijk dat meerdere kabels samenkomen bij een energiehub, waar vervolgens elektrolyse toegepast wordt. Dit worden **hybride aansluiting**<sup>10</sup> genoemd. Door het realiseren van een energiehub vindt systeemintegratie op zee plaats en kan op zee de conversie van elektriciteit naar waterstof al geoptimaliseerd worden waardoor de elektrische aanlandingen een hogere benuttingsgraad hebben.

Bij hybride aansluitingen wordt vanaf de energiehub elektriciteit en waterstof richting de kust getransporteerd. Met hybride aansluitingen vindt systeemintegratie op zee plaats en kan op zee de conversie van elektriciteit naar waterstof al geoptimaliseerd worden waardoor de elektrische verbindingen een hogere benuttingsgraad hebben.

Als hybride aansluitingen gerealiseerd worden, in plaats van radiale aansluitingen, dan heeft dit effect op het energiesysteem en op de inpassing van wind op zee. Om de impact hiervan te bepalen hebben we een doorrekening gemaakt van een scenario met deels hybride aansluitingen in plaats van radiale aansluitingen. Hierbij gaan we uit van 5 radiale elektrische aanlandingen à 2 GW na 2031 (31 GW in totaal) en 19 GW aan hybride aansluitingen, met 5 elektrische aanlandingen à 2 GW, 9 GW offshore elektrolyse en een waterstofverbinding met een capaciteit van 7 GW waterstof (dit correspondeert met de maximale output van de elektrolyser, verschil komt door conversieverliezen). We vergelijken dit scenario met het basisscenario met 10 elektrische aanlandingen à 2 GW en 9 GW

<sup>10</sup> Er wordt ook wel van hybride aansluitingen gesproken bij de combinatie tussen een elektrische verbinding vanaf een windpark richting de kust in combinatie met een interconnector. In dit onderzoek hebben we het bij hybride aansluitingen echter over de combinatie van elektrische verbindingen en waterstofverbindingen.

offshore elektrolyse, die radiaal aangesloten zijn. Dit betekent dat we het aantal aanlandingen en de verhouding tussen elektrische aanlanding en waterstofaanlanding gelijk houden, en we alleen de wijze van aansluiten op zee aanpassen. Dit hebben we doorgerekend voor het scenario Nationaal Leiderschap. Voor de analyses hebben we gebruik gemaakt van het Energietransitiemodel, welke een module bevat voor het meenemen van hybride aansluitingen.

### Impact op de nationale energiebalans

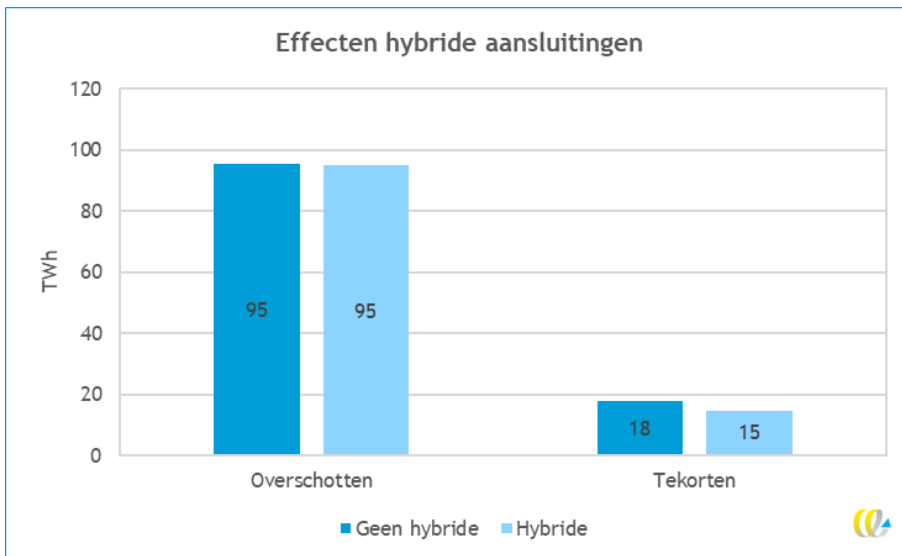
Door toepassing van hybride aansluitingen hoeft de elektrolyser op zee niet het productieprofiel van het windpark op zee te volgen, maar kan deze ingezet worden op basis van marktprijzen en de vraag naar elektriciteit op land. Op momenten met veel wind op zee is de additionele hoeveelheid flexibiliteit beperkt, aangezien dan zowel de elektrische aanlandingen als de waterstofaanlanding maximaal benut moet worden. Maar op momenten met relatief weinig wind op zee bieden hybride aansluitingen extra flexibiliteit doordat meer stroom naar land getransporteerd kan worden.

Dit heeft twee potentiële effecten:

1. Op momenten met relatief weinig wind (bijvoorbeeld 20% van de productie) en weinig zon kan meer elektriciteit richting land getransporteerd worden. Op die momenten is er vraag naar meer elektriciteit op land en zijn de elektriciteitsprijzen relatief hoog. Bij radiale aansluitingen van 10 GW elektriciteit en 9 GW offshore elektrolyse met waterstofaanlanding zou in dit geval slechts 2 GW (20% van 10 GW) elektriciteit naar land getransporteerd kunnen worden. Bij hybride aansluitingen, met dezelfde vermogens, kan op zo'n moment 3,8 GW elektriciteit naar land getransporteerd worden (20% van 19 GW). Hierdoor kan meer energie van windparken op zee direct gebruikt worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag. Daardoor zijn er minder tekorten van elektriciteit, die anders met dure stroom (zoals waterstofcentrales of eventueel import) ingevuld zou moeten worden.
2. Op momenten met relatief weinig wind, maar weinig elektriciteitsvraag op land (of bijvoorbeeld veel productie van zonnepanelen) en lage prijzen, kan er ook gekozen worden om minder elektriciteit naar land te brengen en meer waterstof te produceren op zee. De maatschappelijke meerwaarde hiervan is minder groot, aangezien het om overschotten van elektriciteit die dan niet op land maar op zee benut worden. Wel is hierdoor minder transport van elektriciteit nodig, waardoor wat transportverliezen uitgespaard kunnen worden (er is wel waterstoftransport nodig, maar dat heeft minder verliezen).

Uit de doorrekening van het scenario met hybride aansluitingen volgt dat er door toepassing van hybride aansluitingen 3 TWh extra elektriciteit naar land gebracht wordt, wat overeenkomt met ongeveer 3% van de totale productie van de windparken die op de hybride aansluitingen zijn aangesloten. Hierdoor zijn er 3 TWh minder tekorten aan elektriciteit op land (14 TWh in plaats van 17 TWh). Het tweede potentiële effect, minder transport van elektriciteit op momenten met overschotten, vindt nauwelijks plaats.

*Figuur 3-1 Effecten hybride aansluitingen op tekorten en overschotten elektriciteit*



De meerwaarde van hybride aansluitingen zit er dus in dat meer geproduceerde elektriciteit van windparken op zee direct benut kan worden als elektriciteit en dat er daardoor naar verwachting ook minder elektrische verbindingen richting land nodig zijn (NSWPH, 2024). Dat kan leiden tot lagere systeemkosten. Echter, hybride aansluitingen zullen naar verwachting ook hogere kosten hebben in vergelijking tot radiale aansluitingen. Voor de afweging tussen hybride aansluitingen en radiale aansluitingen is een analyse op de impact van de totale systeemkosten noodzakelijk. Uit analyses uit de Pathway Study 2.0 van NSWPH volgt dat toepassing van hybride aansluitingen op de Noordzee naar verwachting leidt tot lagere totale systeemkosten in heel Noordwest-Europa (NSWPH, 2024). Er zijn hierin geen specifieke analyses voor Nederland gedaan.

Er zijn nog andere concepten voor hubs op zee denkbaar, bijvoorbeeld ook voor uitwisseling met het buitenland en andere energiehubs. Ook deze ontwikkelingen kunnen impact hebben op het transport van elektriciteit via verbindingen naar land. Multi-Purpose Interconnectoren<sup>11</sup> kunnen er voor zorgen dat een deel van de stroom niet naar land getransporteerd hoeft te worden op momenten met veel productie van de windparken op zee.

### Impact op mogelijkheden elektrische aanlanding binnen regio's

Door hybride aansluitingen wordt iets meer elektriciteit naar land getransporteerd per kabel, dus de benuttingsgraad van de kabels neemt toe. Er wordt echter alleen meer elektriciteit naar land getransporteerd op uren dat de productie van wind op zee relatief laag is en de piekbelasting voor invoeding van stroom van windparken op zee blijft gelijk. De grootste knelpunten in de aanlandregio's ontstaan door afvoer van wind op zee, op momenten met veel wind op de Noordzee, en die uren verandert er weinig aan de invoeding van elektriciteit. Er kunnen door hybride aansluitingen wel iets meer uren zijn met overschrijding tijdens beperkte inzet van wind op zee, maar relatief hoge prijzen en weinig inzet van flexibele bronnen. Maar uit analyses van de Startintegratie Systeemintegratie volgt dat dit effect beperkt is, waardoor de impact op het aantal aanlandingen dat per regio ingepast kan worden naar verwachting beperkt is.

Daartegenover staat dat er naar verwachting in totaal minder nieuwe elektrische verbindingen richting de kust nodig zijn bij hybride aansluitingen. Dit betekent het netto-effect van hybride

<sup>11</sup> Dit zijn kabels die twee landen verbinden via een windpark op zee, waardoor het tegelijkertijd de functie van interconnector en elektrische aanlanding van het windpark op zee vervult.

aansluitingen naar verwachting is dat wind op zee beter ingepast kan worden in de energie-infrastructuur.

### 3.4.3 Overplanting: meer windmolens aansluiten op hetzelfde aantal kabels

Momenteel wordt bijna het volledige vermogen van windparken op zee ontsloten met elektriciteitskabels naar land<sup>12</sup>. Deze elektriciteitsinfrastructuur op zee is echter erg kostbaar, zeker voor de grotere afstanden bij de windparken op zee waar in pVAWOZ naar gekeken wordt. Daarom kan overwogen worden om overplanting toe te passen, waarbij een groter windvermogen aangesloten wordt op een kabel. Zo zijn minder kabels nodig en krijgen de kabels een grotere benuttingsgraad. Op uren met veel wind op de Noordzee kan dan echter wel minder stroom naar land worden gebracht. Op uren met relatief weinig wind kan wel eenzelfde hoeveelheid wind naar land gebracht worden.

We kijken bij deze systeemkeuze naar de effecten van overplanting op het energiesysteem en de inpassing van wind op zee. Hierbij kijken we enerzijds naar de effecten op de hoeveelheid elektriciteit die naar land gebracht wordt (en hoe deze benut wordt) en de nationale energiebalans. Daarnaast bespreken we de effecten op de mogelijkheden voor aanlanding binnen het pVAWOZ.

We bepalen de effecten voor twee configuraties, die variaties zijn op de referentie (50 GW wind op zee met 10 elektrische verbindingen à 2 GW en 9 GW offshore waterstofproductie). In beide configuraties gaan we uit van de onderzoeksopgave van 50 GW wind op zee in 2040 vanuit pVAWOZ. De twee configuraties die we behandelen zijn:

- **Meer windmolens aansluiten op dezelfde hoeveelheid elektrische verbindingen.** Hierbij nemen we aan dat de volledige onderzoeksopgave van pVAWOZ, 29 GW voor de periode 2031-2040, aangesloten wordt op 10 elektrische verbindingen van 2 GW. In dit geval wordt er dus geen offshore elektrolyse toegepast.
- **Evenveel windmolens aansluiten op minder elektrische verbindingen.** Hierbij nemen we de hoeveelheid wind op zee die als elektriciteit naar land wordt gebracht (20 GW) gelijk, maar nemen we aan dat dit met minder elektrische verbindingen gerealiseerd wordt. We gaan uit van 20 GW wind op zee, aangesloten op 7 verbindingen à 2 GW. Daarnaast is er bij deze variant 9 GW offshore waterstofproductie, net zoals bij de referentie.

Voor beide configuraties brengen we de effecten in kaart ten opzichte van de referentie. Dit doen we voor zowel het scenario Nationaal Leiderschap als Europese Integratie.

De doorgerekende scenario's hebben een extreme mate van overplanting, om de effecten goed zichtbaar te maken. Het is ook mogelijk om minder overplanting toe te passen, bijvoorbeeld 20 GW op 9 verbindingen à 2 GW of 29 GW op 13 elektrische verbindingen à 2 GW. In dat geval is de omvang van de effecten (curtailment op zee, effect op vraag/aanbod balans, inpassing wind op zee en besparing kosten elektriciteitsinfrastructuur op zee) minder groot, maar de globale effecten zullen naar verwachting gelijk zijn. Verder onderzoek is noodzakelijk voor het bepalen van een efficiënte mate van overplanting.

#### Impact op de nationale energiebalans

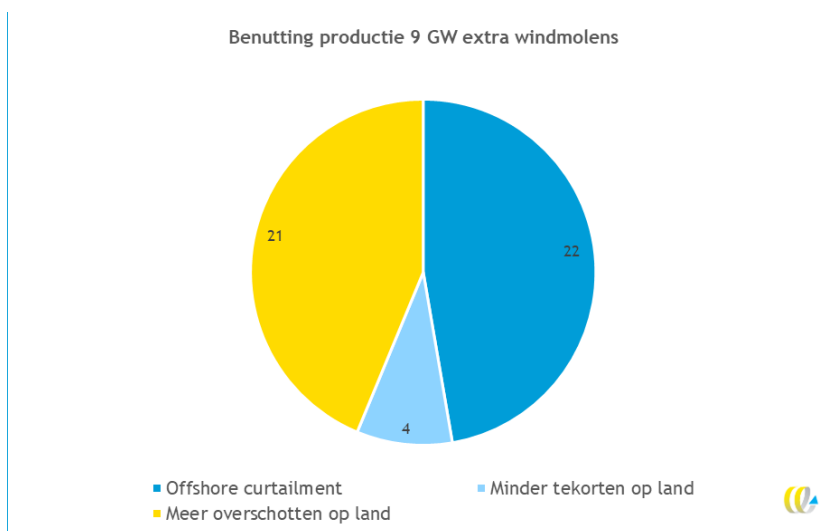
In deze paragraaf bespreken we de effecten van overplanting op de hoeveelheid elektriciteit die naar land gebracht wordt en de energiebalans, voor de beide configuraties.

#### *Meer windmolens aansluiten op dezelfde hoeveelheid elektrische verbindingen*

---

<sup>12</sup> Er vindt momenteel wel een kleine mate van overplanting plaats, maar een stuk minder dan in de uitgevoerde analyses.

Indien 29 GW wind op zee aangesloten wordt, dan neemt de bedrijfstijd van de kabel toe van iets ongeveer 5.000 vollasturen naar ongeveer 6.000 vollasturen. De 9 GW extra windmolens produceren ruim 45 TWh elektriciteit. Hiervan wordt in het scenario Nationaal Leiderschap ongeveer 20 TWh offshore gecurtailed omdat er onvoldoende transportcapaciteit is om de stroom naar land te brengen. Dat is dus ongeveer 45% van de productie van die 9 GW extra windmolens. De overige 25 TWh wordt wel naar land gebracht. Hiervan kan 4 TWh, ongeveer 10% van de totale productie van de extra windmolens die aangesloten worden, direct benut worden als elektriciteit. Het overige deel zorgt voor extra overschotten van elektriciteit op land, die benut kunnen worden met flexibele vraag of export. Maar een deel van deze extra overschotten op land zal ook leiden tot extra curtailment op land, naar verwachting 2 TWh. Dit komt bovenop de hoeveelheid elektriciteit die offshore gecurtailed wordt door onvoldoende transportcapaciteit.

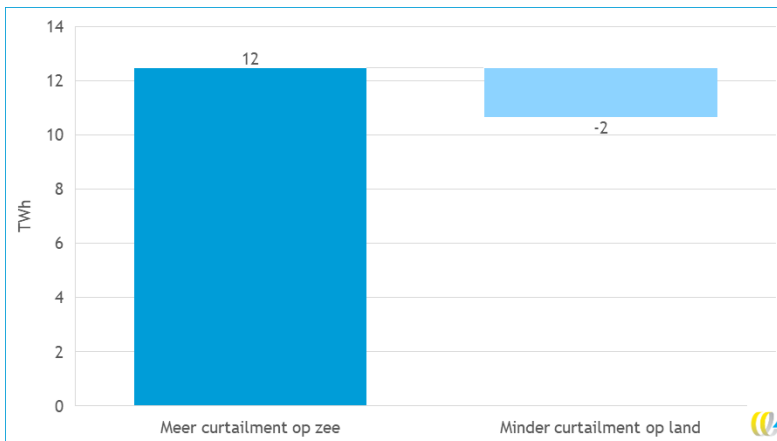


Figuur 3-2 Benutting productie 9 GW extra windmolens

Bovenstaande cijfers gelden voor het scenario Nationaal Leiderschap. Bij het scenario Europese Integratie is het beeld vergelijkbaar. Daar wordt alleen een nog iets kleiner deel van de extra productie van de windmolens direct benut, aangezien de vraag in dit scenario kleiner is en er daarnaast meer productie is van kernenergie.

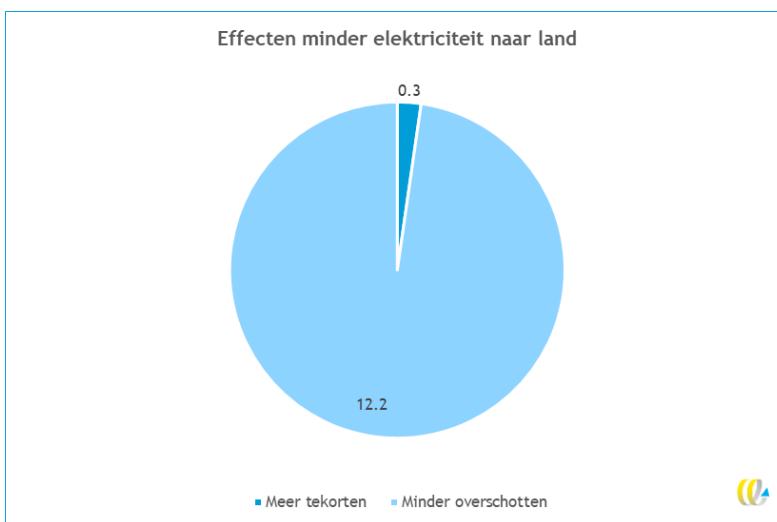
#### **Evenveel windmolens aansluiten op minder verbindingen**

In deze configuratie gaan we uit van 20 GW windmolens op 14 GW kabels. Er worden in dit geval dus drie elektrische verbindingen van 2 GW minder gerealiseerd. In dit geval wordt ruim 12 TWh minder elektriciteit naar land getransporteerd door offshore curtailment. Dit effect wordt deels opgevangen door minder curtailment op land, naar verwachting ongeveer 2 TWh.



Figuur 3-3 Impact evenveel windmolens op minder verbindingen op curtailment

De 12 TWh minder elektriciteit naar land leidt vooral tot minder overschotten van elektriciteit op land. Slecht eens klein deel zou anders direct benut worden voor invulling van de elektriciteitsvraag. Dit komt doordat er bij overplanting vooral minder elektriciteit naar land gebracht wordt op uren met veel productie van windparken op zee, waar er vaak sprake is van overschotten. Op uren met weinig productie van windparken op zee kan de volledige productie naar land getransporteerd worden.



Figuur 3-4 Effect minder elektriciteit naar land

### Conclusies

Bovenstaande analyses laten zien dat:

- Bij beide varianten van overplanting wordt ongeveer 50% van de productie van het extra vermogen aan windmolens (ten opzichte van de aansluitcapaciteit) weggegooid. Dit gebeurt op momenten met veel wind.
- 9 GW extra windmolens aansluiten op dezelfde kabels leidt vooral tot extra overschotten op land. Daarnaast kan 4 TWh, ongeveer 10% van de productie, direct benut worden.
- Het realiseren van 7 elektrische verbindingen à 2 GW in plaats van 10 (bij 20 GW windparken op zee) zorgt ervoor dat ruim 12 TWh minder elektriciteit naar land gebracht wordt. Dit gaat bijna alleen ten koste van de overschotten op land zijn, niet van de tekorten. De overschotten op land hebben echter ook waarde, omdat deze bijvoorbeeld benut kunnen worden door elektrolyzers op land. Daardoor kan dit ertoe leiden dat minder elektrolyse op land mogelijk waardoor meer

andere bronnen van waterstof, zoals import, nodig om aan de vraag naar (groene) waterstof te voorzien

De resultaten van bovenstaande analyse laten zien dat het nuttig is om de optie van overplanting verder te onderzoeken, aangezien de kosten voor energie-infrastructuur op zee verminderd kunnen worden en het directe gebruik van elektriciteit nauwelijks afneemt. Daarbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat er door het weggooien van elektriciteit minder overschotten zijn, en daarmee ook minder elektrolyse op land mogelijk is. Dan zijn andere bronnen van waterstof, zoals import, nodig om aan de vraag naar (groene) waterstof te voorzien.

Deels komen deze effecten voort uit het feit dat er, ten opzichte van de vraag, al veel opwek gerealiseerd wordt. In plaats van het aansluiten van extra windmolens op dezelfde kabels, of dezelfde hoeveelheid wind op zee op minder kabels, kan het ook een optie zijn om überhaupt minder windmolens op zee elektrisch te ontsluiten (bijvoorbeeld 14 GW wind op zee op 14 GW kabels). Dit kan door de minder wind op zee te realiseren of door meer offshore elektrolyse toe te passen (meer hierover in paragraaf 3.4.1).

Voor een maatschappelijk optimale keuze dienen al deze opties tegen elkaar afgewogen te worden. Daarbij dient niet alleen naar de energetische effecten gekeken te worden, zoals in onze analyse, maar ook naar andere aspecten zoals kosten, ruimtelijke effecten en uitvoerbaarheid. Daarnaast moet ook onderzocht worden wat de impact van deze concepten op de business case voor ontwikkelaars van de windparken is, aangezien deze zal verslechteren bij toepassing van overplanting. Hier is verder onderzoek naar nodig.

### **Impact op mogelijkheden elektrische aanlanding binnen regio's**

De keuzes voor overplanting kunnen op twee manieren impact hebben op de inpassing van wind op zee in de infrastructuur op land, en daarmee op de mogelijkheden voor aanlanding binnen regio's: Er wordt meer elektriciteit per kabel getransporteerd bij overplanting, wat effect heeft op het transport van elektriciteit via de HS-verbindingen rondom de aansluitlocaties, en daarmee potentieel op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast kan worden.

- Er wordt per kabel tot 20% meer elektriciteit naar land gebracht. Echter, dit gebeurt met name op uren met relatief weinig wind. Op momenten met veel wind blijft de invoeding gelijk en ook het piekvermogen voor invoeding van wind op zee blijft gelijk. Uit de analyses voor de impact van wind op zee op het hoogspanningsnet volgt dat er met name knelpunten kunnen ontstaan door afvoer van windstroom op momenten met veel wind. Het is wel mogelijk dat er iets meer uren met overschrijding ontstaan, bijvoorbeeld op uren met relatief weinig wind op de Noordzee maar ook weinig (flexibele) vraag. Maar we verwachten dat dit laatste effect beperkt is en dat de impact van overplanting op het aantal elektrische verbindingen dat ingepast kan worden per regio beperkt is.
- Als er gekozen wordt om de windparken op zee met minder elektrische verbindingen aan te sluiten, dan betekent dit vanzelfsprekend dat er in totaal minder elektrische verbindingen ingepast hoeven te worden in het energiesysteem.

Dit betekent dat deze systeemkeuzes ervoor kunnen zorgen dat wind op zee makkelijker ingepast kan worden, aangezien het effect op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast naar verwachting beperkt is en er in totaal minder elektrische verbindingen nodig zijn. Zo kan potentieel een groter vermogen aan windmolens ingepast worden, zonder forse uitbreidingen aan de hoogspanningsinfrastructuur.

## 4 Vraagontwikkeling CES 3.0

### 4.1 Samenvatting

In de scenario's die gehanteerd worden voor de beoordeling Systeemintegratie zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie in de grote industrieclusters. In de nieuwste Cluster Energie Strategieën (CES 3.0) hebben de grote industrieclusters ook een inschatting hiervan gemaakt, op basis van de (verduurzamings)plannen van individuele bedrijven<sup>13</sup>. In deze verschillen- en gevoeligheidsanalyse hebben we onderzocht of de beelden over de ontwikkeling van vraag en aanbod in de CES in lijn zijn met de gehanteerde scenario's en wat de effecten zijn van eventuele verschillen op de inpassing van wind op zee.

De belangrijkste conclusies over verschillen in aannames over vraagontwikkeling tussen de CES 3.0 en de doorgerekende scenario's zijn:

- **Zeeland.** Een groot verschil in aannames is de ontwikkeling van kernenergie. In een losse gevoeligheidsanalyse gaan we in op de effecten hiervan (zie hoofdstuk 5). Daarnaast ligt de elektrolysecapaciteit die benoemd wordt in het rapport van de CES SDR ligt echter een stuk hoger dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, namelijk 1,2 GW hoger dan de bovengrens.
  - Door de extra vraag naar elektriciteit van de elektrolyzers kan mogelijk een extra elektrische verbinding ingepast worden.
  - Het hogere aanbod van waterstof lijkt afgevoerd te kunnen worden binnen de capaciteit van het geplande netwerk.
- **Rotterdam.** De geprognoseerde waterstofvraag van de CES 3.0 valt lager uit dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Indien de lokale vraag daadwerkelijk lager uitvalt, zal waterstofaanlanding of lokaal opgewekte waterstof meer doorgevoerd moeten worden naar de rest van Nederland en worden de knelpunten op het waterstofnetwerk bij waterstofaanlanding mogelijk groter. Dit heeft geen impact op de beoordeling (is al negatief vanwege uitbreidingen die nodig zijn in doorgerekende scenario's).
- **Noordzeekanaalgebied.** Het grootste verschil tussen de geprognoseerde plannen van de CES en de doorgerekende scenario's ligt in de elektriciteitsvraag. In de CES wordt uitgegaan van 5 TWh meer elektriciteitsvraag uit industrie en van elektrolyse. Dit komt overeen met ongeveer 0,6 GW extra vraag. Hierdoor kan iets meer aanbod van wind op zee lokaal benut worden en kan er mogelijk iets meer wind op zee aanlanden, maar of dit ertoe leidt dat een extra elektrische verbinding (à 2 GW) ingepast kan worden, is onzeker.
- **Chemelot.** De plannen van Chemelot zijn van belang voor de effecten van diepe aanlanding wind op zee in Limburg. Daarom is het ook van belang om naar deze plannen. Er zijn wat verschillen tussen de geprognoseerde plannen vanuit de CES en in de doorgerekende scenario's van pVAWOZ, maar dit komt vooral door de grote bandbreedte in de prognoses voor 2040 binnen de CES (door gebrek aan kwantificering en aanscherping). Daarom kan op dit moment geen zinnige uitspraak gedaan worden over effecten van de CES (en verschillen met de doorgerekende scenario's) op de inpassing van wind op zee.
- **Noord-Nederland.** De elektrolysecapaciteit die benoemd wordt in het rapport van de CES Noord-Nederland ligt echter een stuk hoger dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, namelijk 1,7 GW hoger dan de bovengrens. Als er inderdaad een stuk meer elektrolyse gerealiseerd wordt, dan heeft dat de volgende effecten:

---

<sup>13</sup> Voor een groot deel van de verduurzamingsontwikkelingen die meegenomen worden in de CES is door de bedrijven nog geen definitieve investeringsbeslissing genomen.

- Door de extra vraag naar elektriciteit van de elektrolyzers kan mogelijk een extra elektrische verbinding ingepast worden.
- Het aanbod van waterstof lijkt afgevoerd te kunnen worden met het geplande netwerk.

## 4.2 Introductie

### 4.2.1 Aanleiding en aanpak

In de scenario's die gehanteerd worden voor de beoordeling Systeemintegratie zijn aannames gemaakt over de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie in de grote industrieclusters. In de nieuwste Cluster Energie Strategieën (CES 3.0) hebben de grote industrieclusters ook een inschatting hiervan gemaakt, op basis van de plannen van individuele bedrijven. Het is van belang om te weten wat de impact van deze plannen van de industrieën zijn op de inpassing van wind op zee, en of dit leidt tot andere conclusies over het aantal elektrische- en waterstofverbindingen dat per regio inpasbaar is. Daarom voeren we een verschillen- en gevoeligheidsanalyse uit voor de CES 3.0

In deze verschillen- en gevoeligheidsanalyse hebben we onderzocht of de beelden over de ontwikkeling van vraag en aanbod in de CES in lijn zijn met de gehanteerde scenario's voor de beoordeling Systeemintegratie binnen pVAWOZ (verschillenanalyse). Vervolgens bepalen we wat de effecten zijn van eventuele verschillen op de inpassing van wind op zee (gevoeligheidsanalyse).

Daarnaast hebben verschillende CES'sen eigen analyses gedaan naar de impact van de ontwikkelingen op het energiesysteem en de energie-infrastructuur, waarbij ze ook ingaan op de impact van wind op zee. We vergelijken de resultaten en de conclusies van deze systeemanalyses van de CES'sen met de conclusies van de beoordeling Systeemintegratie van pVAWOZ en duiden de verschillen.

#### **Afbakening gebieden niet exact hetzelfde, maar data wel vergelijkbaar**

De afbakening van de gebieden in de CES 3.0 komt niet exact overeen met de afbakening van de regio's in pVAWOZ (CES kijkt naar Rotterdam-Moerdijk samen, in pVAWOZ kijken we hier los naar). CES SDR neemt ook energievraag West-Brabant mee, in pVAWOZ kijken we specifiek naar Zeeland). We maken voor de vergelijking van de aannames rondom vraag en aanbod echter gebruik van datasets van de netbeheerders, over de cijfers van de CES en de cijfers van de scenario's van ii3050 (die gebruikt worden binnen pVAWOZ). De data van de verschillende scenario's in de dataset van de netbeheerders hebben een gelijke geografische afbakening, en daarmee kunnen deze cijfers dus vergeleken worden.

### 4.2.2 Welke data gebruiken we?

Voor de gevoeligheidsanalyse gebruiken we de vraag- en aanbodcijfers zoals deze zijn ontvangen door de netbeheerders via de verschillende CES'en. Deze cijfers vormen de basis voor de infrastructuuranalyse in elke CES. In sommige gevallen wijken deze cijfers af van de gegevens die de clusters zelf weergeven in de rapportages van de CES 3.0. We kiezen ervoor om gebruik te maken van de cijfers die de netbeheerders ook gebruiken, omdat die cijfers vollediger zijn en de cijfers die we hanteren van de verschillende regio's zo ook consistent zijn.

Het verschil tussen de cijfers van de rapportages van de CES'en en de cijfers van de netbeheerders is vermoedelijk ontstaan doordat niet alle elektrolyseplannen zijn gemeld aan de netbeheerder, of doordat er na de verzending van de plannen naar de netbeheerders nog extra projecten en/of import zijn toegevoegd, die wel zijn opgenomen in de finale publicatie van de CES'en. Hierdoor komen binnen een CES-document verschillende cijfers voor hetzelfde onderwerp naar voren.

Indien er grote verschillen zijn tussen de cijfers van de netbeheerders en de cijfers in de rapportage van de CES, dan wordt dit aangegeven.

## 4.3 Zeeland

### 4.3.1 Introductie CES

De Schelde-Deltaregio (SDR) omvat industrie in Zeeland en België (North Sea Port met Vlissingen, Terneuzen en langs de Kanaalzone naar Gent) en de regio Bergen op Zoom. Het gaat hierbij om bedrijven actief in automotive, biobased, chemie (Dow, Air Liquide), energie, food (Cargill), kunstmest (Yara), logistiek, raffinage (Vopak) en staal (Arcelor Mittal Gent).

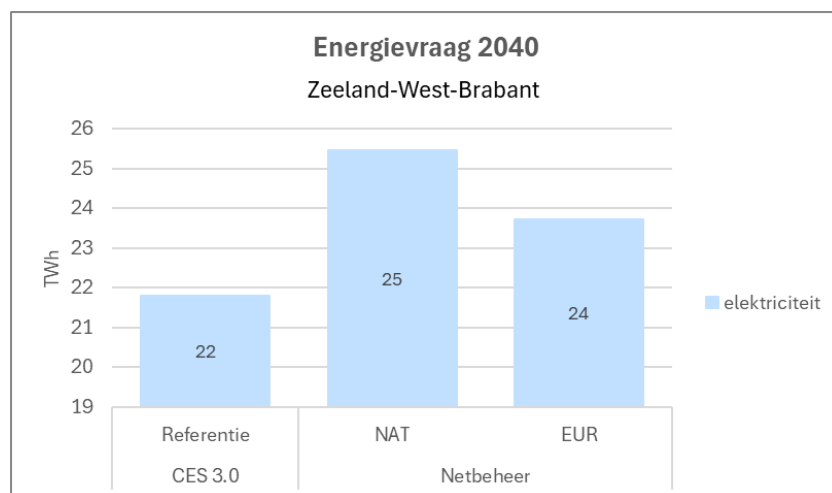
De data en voorgenomen plannen uit de CES richten zich op Nederlandse industrie en bevat data van Nederlandse ETS-bedrijven binnen de SDR. De data die is gebruikt voor de CES 3.0 is gebaseerd op zo'n 60 verduurzamingsprojecten van bestaande en nieuwe bedrijven in de regio. Deze verschillen in schaalgrootte, timing en concreetheid. In het rapport is 97% van deze ETS-uitstoot in de regio afgedekt. Nieuw in deze CES 3.0 is de systeemanalyse a.d.h.v. de in kaart gebrachte verduurzamingsplannen en hun eigen model (Regional Net Zero Model, RNZM). Ze gaan vervolgens vooral in op knelpunten die voortkomen uit het model en vereiste infrastructuur voor de verduurzamingsplannen van de industrie.

### 4.3.2 Verschillenanalyse

#### Energievraag industrie

##### Elektriciteit

De door de CES opgegeven elektriciteitsvraag zit aan de onderkant van de doorgerekende scenario's, zoals te zien in onderstaande figuur.

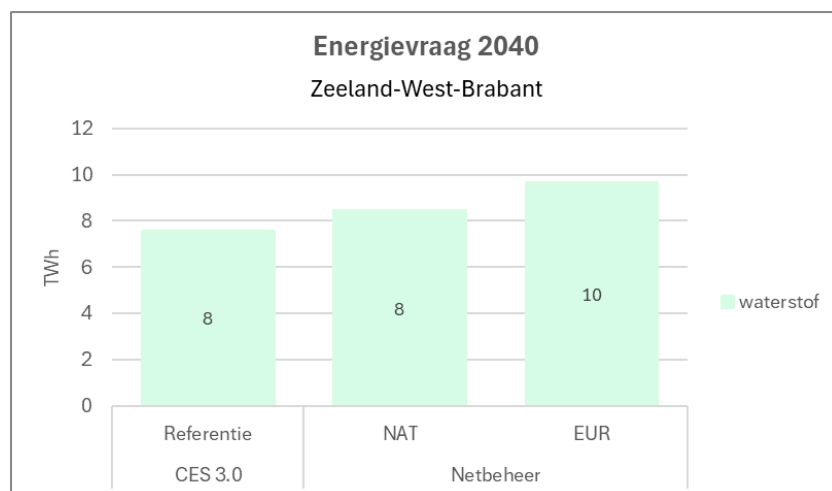


Figuur 4-1 Elektriciteitsvraag cluster SDR 2040

**Kanttekening:** De CES geeft in hun eigen rapportage in de CES3.0 aan uit te gaan van fors meer elektriciteitsvraag, namelijk 40 TWh. Dit verschil komt vooral doordat in de cijfers in de rapportage van de CES uitgegaan wordt van meer elektrolyse (meer hierover bij het kopje elektrolyse). De prognose uit de rapportage van de CES ligt een stuk hoger dan de bovengrens van de scenario's van de netbeheerders, die gebruikt zijn voor de analyses van pVAWOZ.

#### Waterstof

De door de CES opgegeven waterstofvraag valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, zoals te zien in onderstaande figuur.



Figuur 4-2 Waterstofvraag cluster SDR 2040

#### Aanbod energie (exclusief wind op zee)

- Wind op land is in de doorgerekende scenario's 400-700 MW. In de CES vergelijkbaar. Zon-PV lijkt in scenario's die doorgerekend hoger dan in CES, maar dit is voor de inpassing van wind op zee minder relevant.
- In CES SDR wordt uitgegaan van 2 nieuwe grote kerncentrales + huidig. Dus 3,7 GW. Dat is meer dan bovengrens uit scenario's, daar is het 1 tot 1,8 GW. Maar dit is ondervangen met losse gevoeligheidsanalyses voor kernenergie, waar ook de situatie met 3,7 GW kernenergie in Zeeland doorgerekend is (zie hoofdstuk 5).

#### Elektrolyse

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de hoeveelheid elektrolyse in de doorgerekende scenario's, bij verschillende hoeveelheden wind op zee.

Tabel 4-1 Hoeveelheden elektrolyse in doorgerekende scenario's

Regio	Nationaal Leiderschap					Europese Integratie					
	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	
Zeeland	2500	2800	3500			1450	1550	1900			MW

CES SDR heeft aan de netbeheerder aangegeven dat zij in 2040 12,8 TWh aan elektriciteitsvraag voor elektrolyzers verwachten. Dit komt overeen met ongeveer 2,5 GW aan elektrolyzers. Dit valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.

Kanttekening: De CES geeft in hun eigen rapportage in de CES3.0 aan uit te gaan van fors meer elektrolyse, namelijk 4,7 GW (ongeveer gelijk aan 21 TWh) in 2040. Dit komt dus niet overeen met de eerder doorgegeven data aan de netbeheerders, die gebruikt wordt voor deze gevoeligheidsanalyse. De prognose uit de rapportage van de CES, 4,7 GW, ligt 1,2 GW hoger dan de bovengrens van de gehanteerde scenario's.

#### Conclusies

- De voorziene elektriciteitsvraag in de CES ligt iets lager dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, maar het verschil is beperkt (2 TWh, ongeveer 250 MW). Kanttekening hierbij is dat de cijfers in het rapport van de CES 3.0 niet overeenkomen met de

doorgegeven cijfers aan de netbeheerders. De cijfers over elektriciteitsvraag in het rapport van de CES 3.0 ligt een stuk hoger dan de bovengrens van de gehanteerde scenario's.

- De voorziene waterstofvraag in de CES is vergelijkbaar met de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.
- Bij aanbod is er vooral een relevant verschil met kernenergie, maar dat wordt nog uitgezocht in andere gevoeligheidsanalyse (zie hoofdstuk 5).
- De voorziene elektrolysecapaciteit in de CES valt binnen de doorgerekende scenario's. Kanttekening hierbij is dat de cijfers in het rapport van de CES 3.0 niet overeenkomen met de doorgegeven cijfers aan de netbeheerders. De cijfers over elektrolysecapaciteit in het rapport van de CES 3.0 ligt een stuk hoger dan de bovengrens van de gehanteerde scenario's.

### 4.3.3 Gevoeligheidsanalyse

De grootste verschillen tussen de aannames in de doorgerekende scenario's en in de CES 3.0 zijn de aannames rondom de ontwikkeling van kernenergie. In losse gevoeligheidsanalyses gaan we in op de effecten hiervan (zie hoofdstuk 5).

Ook de cijfers voor de elektrolysecapaciteit vanuit de CES, zoals doorgegeven aan de netbeheerders, liggen binnen de bandbreedte van de gehanteerde scenario's. Maar de CES geeft in hun eigen rapportage in de CES3.0 aan uit te gaan van fors meer elektrolyse, namelijk 4,7 GW in 2040. Dit ligt 1,2 GW hoger dan de bovengrens van de gehanteerde scenario's.

- Door de extra vraag naar elektriciteit van de elektrolyzers kan meer aanbod van wind op zee lokaal benut worden. Gezien het verschil (1,2 GW) kan er dan mogelijk een extra elektrische verbinding à 2 GW ingepast te kunnen worden, aangezien we verwachten dat er een sterke correlatie is tussen de afname van elektriciteit van elektrolyzers en het aanbod van wind op zee (zie paragraaf 2.4.3).
- Er moet meer waterstof afgevoerd worden richting de rest van Nederland (het voorziene aanbod van waterstof ligt een stuk hoger dan de vraag, ook bij lagere hoeveelheden elektrolyse. Het hogere aanbod van waterstof lijkt afgevoerd te kunnen worden binnen de capaciteit van het geplande netwerk.

### 4.3.4 Vergelijking uitkomsten systeemanalyse en verklaring verschillen

In de CES 3.0 van de SDR is ook een inschatting gemaakt van de impact van de impact van de verschillende verduurzamingsplannen in de regio op de 380kV-infrastructuur, waaronder de aanlanding van wind op zee en kernenergie. Hiervoor is gebruik gemaakt van het Regional Net Zero Model, een techno-economisch optimalisatiemodel dat ontwikkeld is door SDR, Quo Mare en ISPT.

In de CES is met die model een systeemanalyse gedaan met de verduurzamingsplannen van de industrie, met 1 extra elektrische verbinding van 2 GW van wind op zee in de zichtperiode van pVAWOZ en 2 nieuwe grote kerncentrales. Uit de analyses van de CES volgt dat er forse knelpunten op de 380kV-verbindingen ontstaan bij die verwachte ontwikkelingen. Dat strookt niet met de resultaten uit de doorrekeningen van TenneT. Daaruit komen in het doorgerekende scenario met extra 1 elektrische verbinding en 2 nieuwe grote kerncentrales geen forse knelpunten naar voren.

De verschillen tussen de systeemanalyse van de CES 3.0 van SDR en de analyses van pVAWOZ kan verschillende oorzaken hebben:

- **Andere aannames vraagontwikkeling elektriciteit.** In de doorrekeningen van TenneT wordt uitgegaan van de i3050 scenario's, in de systeemanalyse van de CES wordt uitgegaan van hun

inschatting van de ontwikkeling van de vraag. In de CES 3.0 wordt uitgegaan van meer elektrolyse en elektriciteitsvraag<sup>14</sup>, dat kan een verschil maken.. Zie ook paragraaf 4.3.2.

- **Ander model.** In de CES 3.0 van SDR is gebruik gemaakt van een eigen model voor het bepalen van de netimpact van de ontwikkelingen. In dit model zullen andere aannames gemaakt worden dan in de modellering van TenneT. Onderdelen van de modellering die een belangrijke factor kunnen zijn bij de verschillen tussen beide analyses zijn: aannames rond inzet van de kerncentrales en andere onderdelen van het energiesysteem (bv elektrolyse) en de nettopologie en daaraan gerelateerde transportcapaciteit.

## 4.4 Rotterdam – Moerdijk

### 4.4.1 Introductie CES Rotterdam - Moerdijk

De regio Rotterdam-Moerdijk omvat het grootste industriecluster van Nederland. Het cluster herbergt onder andere raffinaderijen (Shell, BP), chemische industrie, logistieke hubs en energiecentrales. De derde editie van CES Rotterdam-Moerdijk biedt inzicht in de infrastructuurbehoeften om de energietransitie te faciliteren, op basis van data verzameld m.b.v. een Data Safe House. De CES 3.0 biedt een geactualiseerd inzicht in de verduurzamingsplannen van meer dan 300 projecten en inzichten van meer dan 63 productielocaties, die samen verantwoordelijk zijn voor 95% van de huidige CO<sub>2</sub>-uitstoot en energievraag in het cluster. Deze editie heeft een gedetailleerd beeld van de energievraag en -aanbod tot 2035, en maakt gebruik van scenario's voor de periode 2035-2050. Nieuw in deze editie is een diepgaande systeemanalyse die knelpunten identificeert en oplossingen onderzoekt.

### 4.4.2 Verschillenanalyse

#### Energievraag industrie

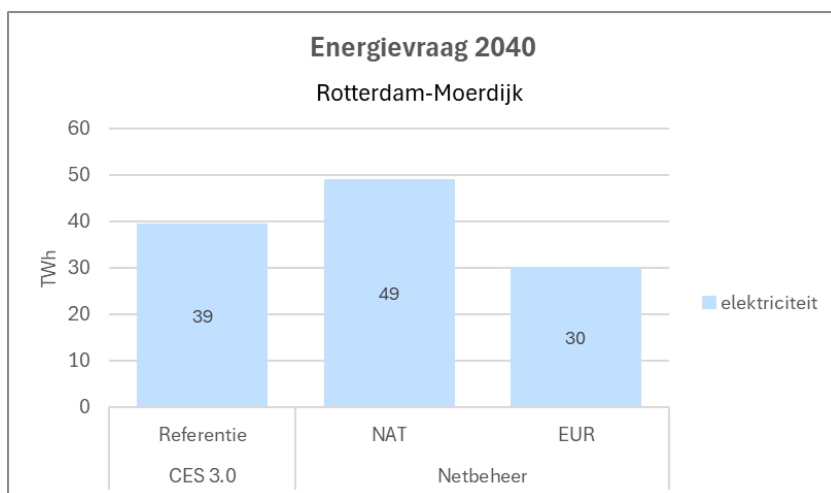
##### *Elektriciteit*

De opgegeven elektriciteitsvraag van de industrie valt binnen de bandbreedte van de bestaande scenario's van de netbeheerders. Richting 2035 ligt de verwachte vraag van de industrie aan de bovenkant van de vraag waarmee rekening werd gehouden door netbeheerders. In 2040 ligt de verwachte vraag van de industrie vanuit de CES 3.0 weer in het midden van de scenario's van de netbeheerders.

Op de langere termijn (2040 en later) wordt in de bestaande scenario's van de netbeheerders gerekend met een grotere spreiding en groei dan nu is opgegeven door de industrie. Daarbij gaan met name de scenario's van de netbeheerders met de hoogste elektriciteitsvraag uit van een hogere productie van synthetische brandstoffen dan nu is opgegeven door de industrie. Dit bevestigt het beeld dat plannen voor de langere termijn veelal nog niet bekend of vastgelegd zijn.

---

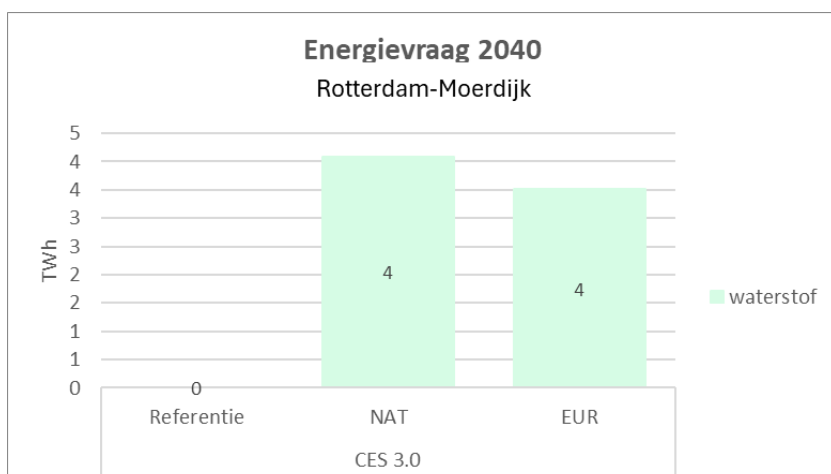
<sup>14</sup> Dit geldt voor de waardes die weergegeven worden in het rapport.



Figuur 4-3 Elektriciteitsvraag cluster Rotterdam-Moerdijk 2040

### Waterstof

Voor waterstof is door de industrie voor deze CES minder vraag (en aanbod) opgegeven dan wordt voorzien in de bestaande scenario's van de netbeheerders. Dit is deels te verklaren omdat nog niet alle plannen op lange termijn, na 2035, bekend zijn. De langetermijnvisie op nieuwe elektrolyseprojecten en importcapaciteit vereist nadere invulling.



Figuur 4-4 Waterstofvraag cluster Rotterdam-Moerdijk 2040

### Aanbod energie (exclusief wind op zee)

#### Elektriciteit

In 2040 is de prognose van de CES dat er 61 TWh aanbod aan elektriciteit is in het cluster. Het aanbod aan elektriciteit valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's (73 en 56 TWh). Het is onduidelijk in de CES 3.0 hoeveel wind op zee onderdeel is van dit aanbod. Vermoedelijk minimaal 29,6 TWh, zoals door de CES wordt aangenomen voor 2035. Er is in de CES 3.0 geen kernenergie meegenomen in het aanbod van elektriciteit.

#### Waterstof

In 2040 is de prognose van de CES dat er een aanbod van waterstof is van 66 TWh. Dit valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende situaties (50 en 84 TWh). Er zijn geen concrete plannen opgegeven voor met name elektrolyse voorbij 2035. Daarom is het aanbod in 2035, 2040 en 2050 gelijk aan 66 TWh.

## Elektrolyse

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de hoeveelheid elektrolyse in de doorgerekende scenario's, bij verschillende hoeveelheden wind op zee.

Tabel 4-2 Hoeveelheden elektrolyse in doorgerekende scenario's

Regio	Nationaal Leiderschap					Europese Integratie					
	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	
Zuid-Holland	3000	3800	4600	5500		1900	2300	2700	3200		MW

CES Rotterdam – Moerdijk gaat voor 2035 uit van 3,15 GW elektrolyzers met een stroomvraag van 16 TWh (voor 10,8 TWh H2). Op dit moment zijn 7 elektrolyzers gepland in het gebied Maasvlakte-Europoort, totale capaciteit 3,15 GW. Hiervan is 2,15 GW gepland voor ingebruikname tussen 2025 en 2030. Zeevonk II van Vattenfall en CIP op de Maasvlakte met een capaciteit van maximaal 1 GW zal geïntegreerd met stroom vanuit het windpark IJmuiden Ver Beta worden. De ingebruikname is nog onbekend. Er zijn geen concrete plannen opgegeven voor met name elektrolyse voorbij 2035. Daarom is het vermogen aan elektrolyse voor de CES 3.0 in 2040 en 2050 gelijk aan het vermogen in 2035.

De verwachtingen van de CES voor elektrolyse voor 2040 vallen binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.

## Conclusies

- Elektriciteitsvraag valt binnen de bandbreedte van doorgerekende scenario's VAWOZ
- Waterstofvraag zit onder de bandbreedte van doorgerekende scenario's VAWOZ, deels doordat plannen na 2035 nog niet bekend zijn.
- Het elektriciteitsaanbod valt binnen de bandbreedte, waterstofaanbod ook.
- Elektrolyzers gaat CES uit van 3,15 GW in 2035. Dit valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.

### 4.4.3 Gevoeligheidsanalyse

Er zijn geen grote verschillen rondom vraag elektriciteit en elektrolyzers, de plannen van de CES 3.0 vallen binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.

De geprognostiseerde waterstofvraag van de CES 3.0 valt wel lager uit dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, maar dit komt met name doordat toekomstplannen vanuit de industrie niet bekend en daardoor niet meegenomen zijn in de CES 3.0. Indien de lokale vraag daadwerkelijk lager uitvalt, zal waterstofaanlanding of lokaal opgewekte waterstof meer doorgevoerd moeten worden naar de rest van Nederland. Dit heeft impact op het waterstofnetwerk. Uit analyses van Gasunie volgt dat er bij waterstofaanlanding in Rotterdam uitbreidingen nodig zijn van het waterstofnetwerk. Minder waterstofvraag vanuit het cluster versterkt dit mogelijk, maar vermoedelijk wel met beperkte omvang. De lagere vraag is namelijk 5 TWh minder dan de ondergrens van de doorgerekende scenario's, dat komt overeen met max 1 GW. Ter vergelijking, bij waterstofaanlanding gaat het om 7 GW aanlanding, bij import gaat het waarschijnlijk zelfs nog om grotere vermogens.

### 4.4.4 Vergelijking uitkomsten systeemanalyse en verklaring verschillen

Voor de CES Rotterdam – Moerdijk is een cluster systeemanalyse uitgevoerd waarin verschillende scenario's zijn gemodelleerd voor 2035. Hiervoor is door TenneT, Stedin en Enexis een analyse

gedaan voor hun eigen netwerken en een cluster systeemanalyse uitgevoerd door QuoMare voor Rotterdam met het TEACOS-model (Techno-Economic Analysis Of Complex Option Spaces) en door Water and Energy Solutions voor Moerdijk door opgegeven plannen van de industrie vergeleken met investeringsplannen van de netbeheerders.

Uit de analyse van de CES volgt dat ze bij de 380kV-verbindingen Maasvlakte – Europoort en Geertruidenberg – Halsteren overschrijdingen verwachten. De overschrijding Maasvlakte – Europoort zien we niet terug in de doorrekeningen van TenneT voor pVAWOZ, maar daarin zien we wel op andere verbindingen knelpunten ontstaan (zoals Maasvlakte – Simonshaven). Dit verschil kan komen door:

- **Ander zichtjaar.** In de netwerkanalyses voor de CES is gekeken naar het zichtjaar 2035, terwijl we in pVAWOZ kijken naar zichtjaar 2040. Daardoor wordt in de CES vermoedelijk uitgegaan van minder vergewaterde verduurzaming, en bijvoorbeeld minder elektriciteitsvraag. Er wordt hierdoor in de doorrekening van TenneT voor pVAWOZ ook uitgegaan van een extra netuitbreiding in de Randstad (zie volgend punt). De overige netuitbreidingen in de regio zijn gepland voor 2035 en worden in beide analyses meegenomen.
- **Geen netuitbreiding Randstad meegenomen.** In de doorrekeningen van TenneT zijn geplande uitbreidingen meegenomen, waaronder ook een netuitbreiding door de Randstad waar nu een studietraject voor loopt. Dat heeft ook impact op de overige verbindingen in de regio, en deze uitbreiding is vermoedelijk niet meegenomen in de CES. Er is echter ook een doorrekening door TenneT gedaan zonder deze netuitbreiding (zie paragraaf 6.2), en ook daarin komt geen knelpunt naar voren op de verbinding Maasvlakte – Europoort.
- **Andere modellering.** In de CES 3.0 van SDR is gebruik gemaakt van een eigen model voor het bepalen van de netimpact van de ontwikkelingen. In dit model zullen andere aannames gemaakt worden dan in de modellering van TenneT. Onderdelen van de modellering die een belangrijke factor kunnen zijn bij de verschillen tussen beide analyses zijn: aannames rond inzet van de kerncentrales en andere onderdelen van het energiesysteem (bv elektrolyse) en de nettopologie en daaraan gerelateerde transportcapaciteit
- **Andere regionalisatie vraag.** De prognose voor de totale elektriciteitsvraag vanuit de CES valt binnen de bandbreedte van de ii3050 scenario's die gebruikt zijn voor de analyses in pVAWOZ. Maar er kunnen wel verschillen zitten in de regionalisatie van de vraag (waar binnen de regio zit deze vraag), die ook impact kunnen hebben op de knelpunten op verbindingen binnen de regio. Dit kan een reden zijn dat in de doorrekening van TenneT voor pVAWOZ knelpunten naar voren komen op andere verbindingen dan in de analyses voor de CES.

Voor de verbindingen Geertruidenberg – Halsteren komt in de doorrekeningen van TenneT ook een klein knelpunt naar voren, in de configuratie met geen aanlanding in Moerdijk in pVAWOZ. In de analyses van de CES is ook geen aanlanding in Moerdijk meegenomen, dus deze bevindingen van de twee analyses liggen met elkaar in lijn.

In de doorrekeningen van de CES lijkt geen extra wind op zee aanlanding te zijn meegenomen bovenop de geplande aanlandingen tot 2032. Daarmee geeft deze analyse geen inzichten op de mogelijkheden voor inpassing van extra wind op zee en de effecten daarvan op het hoogspanningsnetwerk. De conclusies daarover bij de analyses systeemintegratie van pVAWOZ kan daardoor ook niet vergeleken worden met inzichten uit de systeemanalyse van de CES.

In de CES is ook voor andere onderdelen van het elektriciteitsnet, zoals de 380/150 kV transformatoren, de 150kV verbindingen en de regionale netten, een netimpact analyse gedaan. Hier is in pVAWOZ niet naar gekeken.

In de CES 3.0 worden vanuit de systeemanalyse geen knelpunten aan de waterstofinfrastructuur voorzien, maar er wordt daarbij ook niet gekeken naar waterstofaanlanding. Uit de analyses van pVAWOZ volgt dat er bij waterstofaanlanding naar verwachting wel ingrepen aan het nationale waterstofnetwerk noodzakelijk zijn.

## 4.5 Noordzeekanaalgebied

### 4.5.1 Introductie CES

Het Noordzeekanaalgebied (NZKG) strekt zich van Amsterdam tot en met de Noordzee en bevat meerdere havens. Het bevat staal- en offshore-industrie in de IJmond, voedingsmiddelenindustrie in de Zaanstreek, maakindustrie, Port of Amsterdam met brandstoffencluster (geen raffinage, wel blending) en agrarische producten en luchthaven Schiphol, die kerosine aangevoerd krijgt via de haven van Amsterdam. Daarnaast is het NZKG een sterk verstedelijkt gebied. De analyse van de CES is gebaseerd op input van 40 industriebedrijven, energieleveranciers en regionale stakeholders.

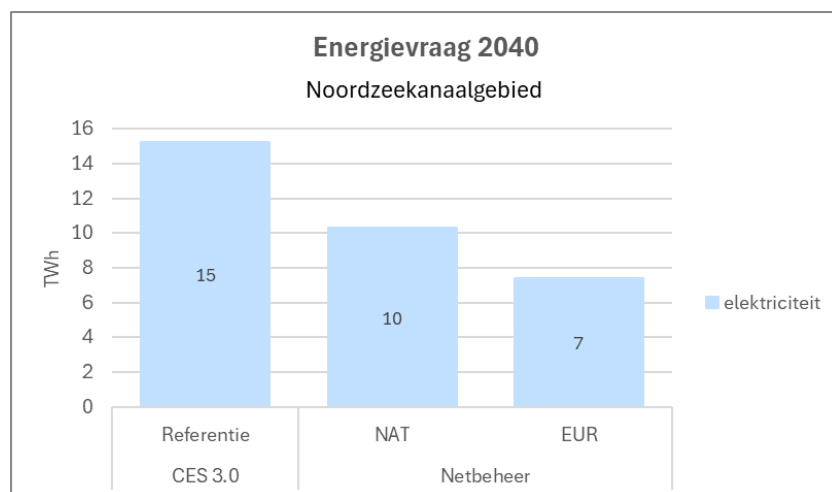
### 4.5.2 Verschillenanalyse

#### Energievraag industrie

##### Elektriciteit

De door de CES opgegeven elektriciteitsvraag bevat plannen voor elektrificatie van de industrie, elektrolyse, productie van synthetische brandstoffen en een toename van walstroom. De elektriciteitsvraag in het NZKG wordt gedomineerd door de elektriciteitsvraag van Tata Steel Nederland (TSN).

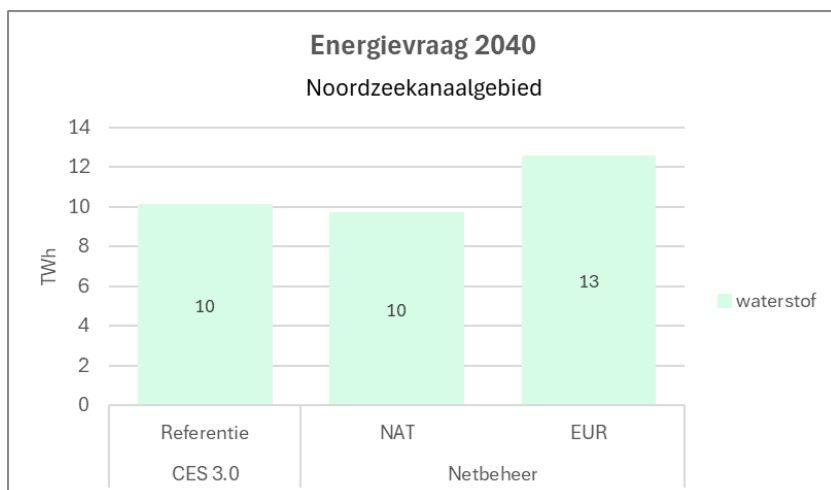
De opgegeven vraag naar elektriciteit in de CES ligt een stuk hoger van de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, zoals te zien in onderstaande figuur. De CES verklaart door een toenemende vraag van Tata Steel Nederland en een hoger verbruik van elektrolyse (er zijn meer concrete plannen voor elektrolyse dan het vermogen dat door de netbeheerders is aangenomen).



Figuur 4-5 Elektriciteitsvraag cluster NZKG 2040

#### Waterstof

De geprognostiseerde waterstofvraag in de CES valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Vraag komt vanuit hoge temperatuurprocessen, productie synthetische brandstoffen en verkenning van bedrijven die niet kunnen elektrificeren door netcongestie. Er is hierbij geen rekening gehouden met de vraagontwikkeling van bijvoorbeeld mobiliteit (vrachtvervoer), of een toename van de productie van fossielvrijbrandstoffen of doorvoer binnen Nederland of naar het achterland. Naar verwachting zal de gewenste vraag dus aanmerkelijk hoger liggen.



Figuur 4-6 Waterstofvraag cluster NZKG 2040

### Aanbod energie (exclusief wind op zee)

#### Elektriciteit

De CES heeft aan de netbeheerders een elektriciteitsaanbod opgegeven van 11 TWh. Het aanbod van elektriciteit ligt daarmee binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's (13 en 10 TWh).

#### Waterstof

In 2040 wordt in de CES een waterstofaanbod van 9,3 TWh verwacht. Het cluster verwacht tot 2040 een overschot aan waterstof en daarna een tekort. Het waterstofaanbod ligt binnen de bandbreedte de doorgerekende scenario's (4 en 23 TWh). De CES benoemt wel dat er enkel twee concrete elektrolyseprojecten en één terminal zijn meegenomen. Daarbij benoemen ze dat ze nu wel al weten dat er drie importterminals voor waterstof zullen komen en het aanbod hiermee hoger komt te liggen. De CES geeft geen indicatie van de omvang 2 extra terminals. Dit betekent dat het verwachte aanbod vanuit de CES eigenlijk hoger ligt. Het is onduidelijk of het dan nog binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's valt.

### Elektrolyse en overige flexbronnen

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de hoeveelheid elektrolyse in de doorgerekende scenario's, bij verschillende hoeveelheden wind op zee.

Tabel 4-3 Hoeveelheden elektrolyse in doorgerekende scenario's

Regio	Nationaal Leiderschap					Europese Integratie					MW
	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	
Noord-Holland Zuid	650	700	700			400	400	400			MW

In de CES wordt aangegeven dat er 700 MW aan concrete plannen is (HyCC H2era, 500 MW, vanaf 2035 en Vattenfall, Hy4Am, 200 MW, vanaf 2030). Dit is de bovengrens van de doorgerekende scenario's.

### Conclusies

- De geprognostiseerde elektriciteitsvraag in de CES ligt ruim (5 TWh) boven de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, door meer elektrolyse en toenemende vraag TSN.

- De geprognostiseerde waterstofvraag vanuit de CES valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.
- Het aanbod van elektriciteit en waterstof in de CES valt binnen de bandbreedtes van de doorgerekende scenario's.
- Elektrolysecapaciteit van de CES ligt op de bovengrens van de doorgerekende scenario's.
- Het transitiepad tussen 2030 en 2050 is onzeker. Voor deze periode is een inschatting gemaakt door de CES, maar de ontwikkeling van nieuwe industrie leidt naar verwachting van de CES tot een grotere vraag naar elektriciteit, waterstof en koolstof dan in gegeven cijfers staat aangegeven. Hoe groot deze vraag is en hoe deze zich ontwikkelt, is op dit moment niet duidelijk.

### 4.5.3 Gevoeligheidsanalyse

Het grootste verschil tussen de geprognostiseerde plannen van de CES en de doorgerekende scenario's ligt in de elektriciteitsvraag. In de CES wordt uitgegaan van 5 TWh meer elektriciteitsvraag uit industrie en van elektrolyse. Dit komt overeen met ongeveer 0,6 GW extra vraag. Hierdoor kan meer aanbod van wind op zee lokaal benut worden en kan er mogelijk iets meer wind op zee aanlanden, maar of dit ertoe leidt dat een extra elektrische verbinding (à 2 GW) ingepast kan worden is onzeker.

### 4.5.4 Vergelijking uitkomsten systeemanalyse en verklaring verschillen

In de systeemanalyse van de CES NZKG is een inschatting gemaakt hoeveel extra elektrische aanlanding van wind op zee ingepast kan worden in de regio. De systeemanalyse is uitgevoerd met een versimpeld model, de impact vanuit andere clusters (bijvoorbeeld Rotterdam) is niet meegenomen, ook zijn (inter)nationale transporten hierin niet meegenomen. Uit de systeemanalyse van de CES volgt dat na 2032 nog twee aanlandingen van 2 GW en een aanlanding van 700 MW, dus in totaal 4,7 GW ingepast kan worden in Noord-Holland Zuid. Uit de doorrekening van TenneT voor pVAWOZ volgt dat er in ieder geval 4 GW ingepast kan worden in de regio (meer dan 4 GW is niet onderzocht). Deze conclusies zijn dus met elkaar in lijn.

Uit de analyses van pVAWOZ volgt echter wel dat het realiseren van extra aanlanding na 2032 in Noord-Holland Zuid wel zeer uitdagend is zonder de netuitbreiding door de Randstad waar nu een studietraject voor loopt (zie paragraaf 6.2). Het is onduidelijk of deze uitbreiding in de systeemanalyses van de CES meegenomen wordt.

## 4.6 Chemelot

### 4.6.1 Introductie CES

Chemelot ligt in Limburg en bevat voornamelijk chemische industrie. Het bevat zestig individuele fabrieken, die veelal met elkaar verbonden zijn.

## 4.6.2 Verschillenanalyse

### Beperkingen data vraag en aanbod CES Chemelot

De kwantificering van vraag en aanbod van de CES Chemelot wijkt af van de andere CES'en. De CES Chemelot heeft geen eigen referentie scenario opgenomen voor de jaren 2040 en 2050. Wel hebben ze een referentie scenario tot de periode 2030-2035, uitgegaan van concrete projecten van bestaande en toekomstige bedrijven op Chemelot. Voor een beeld van de ontwikkelingen naar 2050 zijn op basis van de vier verhaallijnen van de netbeheerders doorzichten opgesteld voor vier uitersten die vervolgens zijn terugvertaald naar 2040. Dit zijn twee wezenlijk verschillende aanpakken waardoor het eindpunt van het eigen referentie scenario dus niet per sé aansluit op het beginpunt van de verhaallijnen.

Bij een aantal bedrijven is geen verhaallijnen-aanpak gehanteerd. Dit is het geval bij bedrijven die buiten de additionele uitvraag vielen, maar bij bedrijven die de verhaallijnen niet wensten te gebruiken. In die gevallen is alleen een voorkeursroute aangegeven.

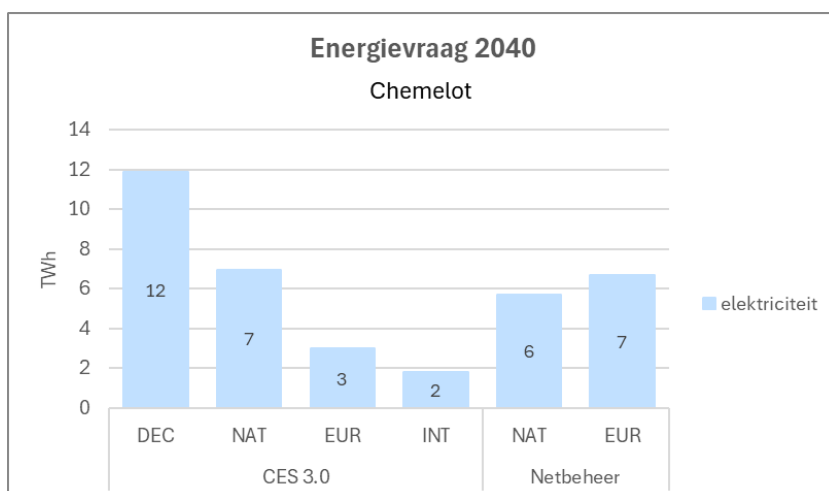
Het komt ook voor dat een deel van de vraag wordt bediend door aanbod bij hetzelfde bedrijf en/of binnen het bedrijvencluster. De transportbehoefte bij de netbeheerder volgt uit de netto-vraag. Sommige bedrijven hebben bruto en netto verdisconteerd in de opgegeven jaarvolumes, sommige ook niet. Dit issue zien we vooral terug bij elektriciteit en waterstof.

Het valt op dat een aantal bedrijven na 2035 geen nieuwe plannen of projecten heeft opgegeven, in welk geval de beelden op langere termijn constant blijven. Dit is herkenbaar aan de latere jaren, waar de scenario's van de netbeheerders uitgaan van verdere verduurzamingsactiviteiten, terwijl de CES-data dit dan maar in beperkte mate laten zien.

### Energievraag industrie

#### Elektriciteit

De onderstaande figuur laat zien dat de scenario's voor de CES 3.0 een grote bandbreedte hebben voor de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag. De vraag van de scenario's EUR en INT zit onder de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. NAT valt binnen de bandbreedte en DEC zit ruim boven de bandbreedte van de doorgerekende scenario's.



Figuur 4-7 Elektriciteitsvraag cluster Chemelot 2040

De grootste verschillen in elektriciteitsvraag in de opgave voor de CES3.0 komt voort uit het wel of niet elektrificeren van de fornuizen van de aardgas reformers en naftakrakers, de elektrolyse van stoom en de beschikbaarheid van plasmatechnologie. De spreiding in de verschillende verhaallijnen

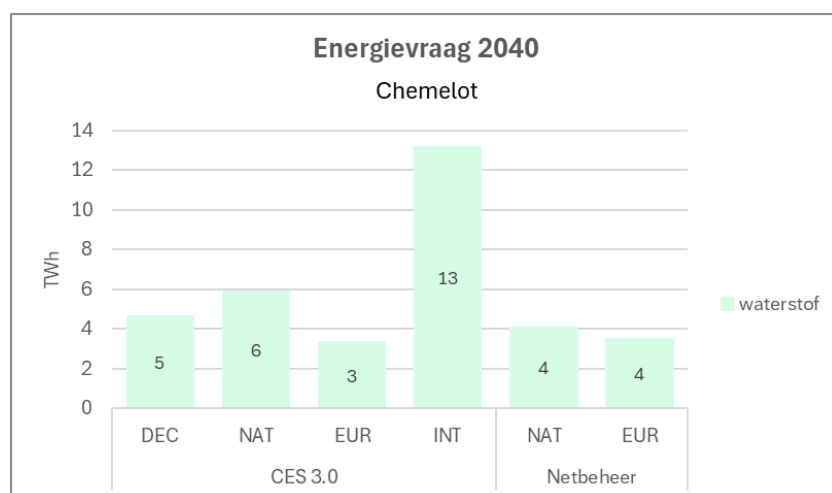
komt voort uit de onzekerheid van de beschikbaarheid van deze technologieën. Daarnaast zit er een grote elektriciteitsvraag in de acquisities van nieuwe site-users op Chemelot, wat een inherent onzeker karakter heeft wat gevangen is in de spreiding.

### Waterstof

Ook voor de waterstofvraag zit er een forse bandbreedte in de scenario's voor de CES. De opgegeven scenario's DEC en NAT hebben een iets hogere waterstofvraag dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, het scenario EUR heeft een iets lagere vraag. De waterstofvraag in het scenario INT zit sterk boven de doorgerekende scenario's. Volgens het cluster is "de grote waterstofvraag bij Internationale Handel een gevolg van de keuze om methaan uit krakers aan de kust om te zetten in waterstof en CO<sub>2</sub>". Het is onduidelijk hoe dit precies bijdraagt aan de hogere waterstofvraag van het cluster Chemelot.

De vraag neemt na 2035 toe en komt in de meeste scenario's richting 2050 boven de scenario-bandbreedte uit. Deels ligt dit aan aannames die in de scenario's anders zijn gekozen, maar in de hoogste scenario's (INT en NAT) is dit ook te herleiden tot nieuwe bedrijvigheid die waterstof nodig heeft.

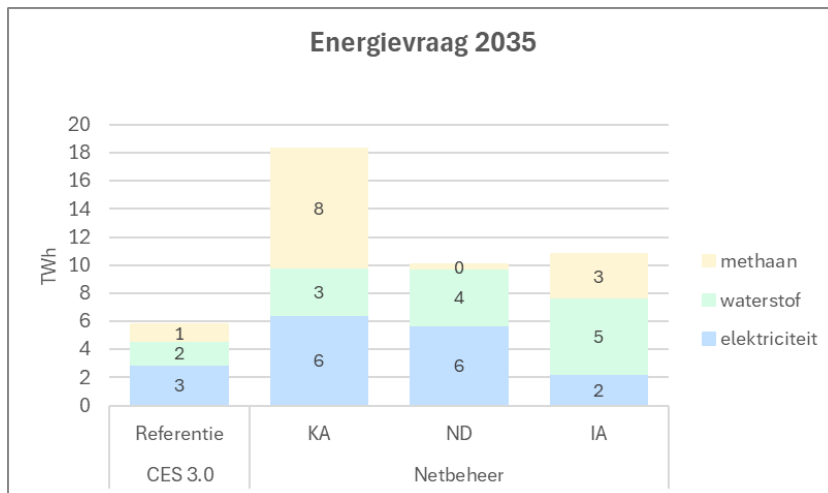
In enkele verhaallijnen zijn enkele projecten met grootschalige inzet van waterstof ingezet voor hoge temperatuur warmte in plaats van elektriciteit. Het cluster geeft wel aan dat vervanging van elektriciteit door waterstof maar beperkt haalbaar is of mogelijk.



Figuur 4-8 Waterstofvraag cluster Chemelot 2040

### Vraag 2035

Voor 2040 is er geen referentiescenario vanuit de CES op basis van input van het cluster, maar voor 2035 wel. Daarom laten we ook de vergelijking zien voor 2035. Dit is onderstaande figuur weergegeven. Het referentiescenario voor 2035 vanuit de CES gaat uit van de meest waarschijnlijke ontwikkeling en is gebaseerd op door huidige site-users verwachte verduurzamingsprojecten en uitbreidingsplannen inclusief een inschatting voor de toekomstige elektriciteitsvraag van nieuwe site-users.



Figuur 4-9 Energievraag cluster Chemelot 2035

Het grootste verschil tussen het referentiescenario en de scenario's van de netbeheerders kan worden verklaard door de sluiting van een kraker van SABIC. Deze werd in de scenario's van de netbeheerders nog geëlektrificeerd.

#### Aanbod energie (exclusief wind op zee)

##### Elektriciteit

Voor het elektriciteitsaanbod wordt gebruikt gemaakt van de marktmodellering van de I13050 voor de centrale productie-eenheden, aangevuld met de opgegeven productie van de decentrale productie-eenheden (warmtekrachtkoppeling en kleinschalige RES). De elektriciteitsproductie wordt alleen weergegeven van eenheden die fysiek in het cluster elektriciteit produceren.

De productie van elektriciteit in het cluster Chemelot is een minieme factor in de totale elektriciteitsvraag in het cluster, waardoor het cluster voor het overgrote deel van de tijd de elektriciteit van het TenneT netwerk geleverd zal blijven krijgen. Het minieme verwachte aanbod van elektriciteit in 2040 door het cluster is in lijn met de doorgerekende scenario's.

##### Waterstof

De huidige inschatting van Chemelot is dat een deel van de totale waterstofbehoefte voorzien kan worden uit duurzame, lokale productie. Hoewel een exacte kwantificatie op dit moment niet kan worden gegeven, gaat externe levering naar de toekomst toe een steeds belangrijkere rol spelen.

Waterstof wordt in belangrijke mate op Chemelot geproduceerd uit (bio)afval in vergassingsinstallaties. Deze waterstof wordt deels ingezet voor bestaande activiteiten.

Naast bestaande lokale waterstofproductie op basis van aardgas in combinatie met CO<sub>2</sub>-afvang en opslag ziet de CES in de toekomst op Chemelot ruimte voor duurzame waterstofproductie. Zowel RWE (projectnaam FUREC) als Uniper en Brigh2 hebben plannen aangekondigd om door middel van vergassingstechnologie op Chemelot circulaire, duurzame waterstof te gaan produceren. RWE heeft inmiddels een Europese innovatiesubsidie van €108 miljoen toegekend gekregen. Ook wordt binnen Brightsite de productie van duurzame waterstof door middel van plasmatechnologie ontwikkeld. Deze plasmatechnologie creëert de mogelijkheid polyetheen (PE) en polypropreen (PP) zonder broeikasgasemissies te produceren en reduceert het gebruik van fossiele nafta.

Het minieme aanbod aan waterstof (< 0,5 TWh) opgegeven door de CES ligt onder de bandbreedte van de doorgerekende scenario's (2-4 TWh). Dit is te verklaren doordat volgens de CES een exacte kwantificatie op dit moment niet kan worden gegeven voor de reeds bekende plannen.

### **Elektrolyse en overige flexbronnen**

In de doorgerekende scenario's van pVAWOZ wordt een klein vermogen aan elektrolyse gerealiseerd bij Chemelot, en vanuit het perspectief van systeemintegratie zien we ook geen reden om in te zetten op grootschalige elektrolyse bij Chemelot bij diepe aanlanding van wind op zee in Limburg (zie paragraaf 2.5.1).

Voor (grootschalige) elektrolyse zijn er op dit moment ook geen plannen op Chemelot en dit lijkt gezien de aard en ligging van het cluster ook minder voor de hand te liggen.

### **Conclusies**

- De spreiding van de vraag naar elektriciteit in de scenario's van Chemelot is een stuk groter dan in de doorgerekende scenario's van de netbeheerders. Een deel van de scenario's vanuit de CES heeft een hogere vraag dan de doorgerekende scenario's, een deel een lagere vraag. Voor toekomstig scenario-ontwerp is een aanscherping van de elektriciteitsvraag voor 2040 en 2050 gewenst.
- De waterstofvraag kent een minder grote spreiding: 3 scenario's liggen om en nabij de doorgerekende scenario's van de netbeheerders, 1 scenario wijkt sterk af en heeft een grotere waterstofvraag dan de doorgerekende scenario's.
- Het elektriciteitsaanbod komt overeen met de doorgerekende scenario's.
- Het waterstofaanbod van de CES ligt onder de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, maar dit komt vermoedelijk vooral door een gebrek aan kwantificering van de CES voor reeds bekende plannen.
- De aannames voor elektrolyse van VAWOZ zijn in lijn met de plannen van de CES.

### **4.6.3 Gevoeligheidsanalyse**

Er zijn wat verschillen tussen de aannames in de CES en in de doorgerekende scenario's van pVAWOZ, maar dit komt vooral door de grote bandbreedte in de prognoses voor 2040 binnen de CES (door gebrek aan kwantificering en aanscherping). Daarom kan op dit moment geen zinnige uitspraak gedaan worden over effecten van de CES (en verschillen met de doorgerekende scenario's) op de inpassing van wind op zee.

### **4.6.4 Vergelijking uitkomsten systeemanalyse en verklaring verschillen**

Het cluster Chemelot heeft geen systeemanalyse uitgevoerd.

## **4.7 Noord-Nederland**

### **4.7.1 Introductie CES**

Onder de CES Noord-Nederland vallen de industrieclusters Eemshaven-Delfzijl en Emmen. Dit cluster voorziet momenteel een derde van de Nederlandse energiebehoefte en produceert 15% van de basischemie. Het gaat met name om de volgende industrieën:

- Eemshaven-Delfzijl: twee zeehavens, 150 bedrijven: (basis)chemie, kunststofvezelindustrie, agro-food, datacenters, recycling, metaal en bio-raffinage. Ook vervult het cluster (voornamelijk in Eemshaven) een belangrijke (inter)nationale rol in grootschalige energieopwekking (3 grote elektriciteitscentrales), energiedistributie (2 onderzeese stroomkabels naar Noorwegen en

Denemarken) en (toekomstige) offshore windlogistiek (aanleg en onderhoud). Ook is er een LNG-terminal in de Eemshaven. In Delfzijl met name chemische industrie (Nobian, Teijin, Avantium en OCI) en er wordt ruimte ontwikkeld voor bio-based productie en recycling.

- Emmen: focus op bio-based chemicaliën, polymeren en recycling (garens, vezels, hightech systemen, agribusiness en (bio)brandstoffen) met bedrijven zoals Teijin Aramide en DSM. In het cluster ligt daarmee een sterke focus op vergroening van de vezelchemie, mechanische en chemische recycling van polyester en de ontwikkeling van groene kunststoffen.

## 4.7.2 Verschillenanalyse

### Energievraag industrie

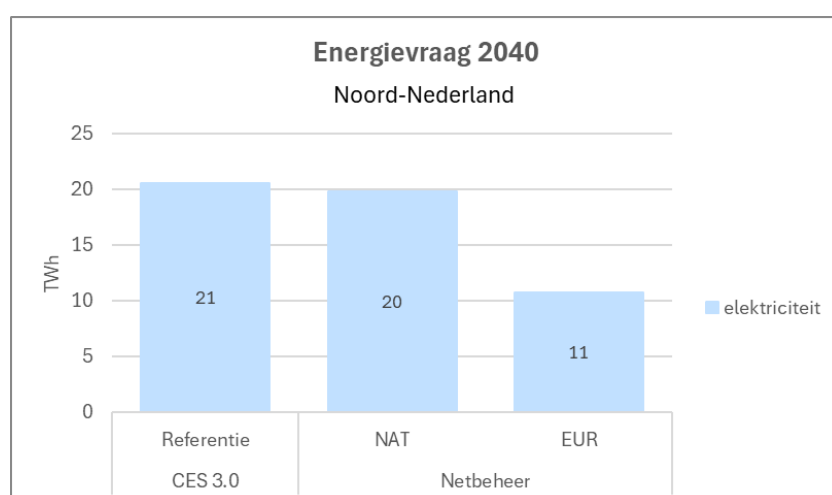
#### Elektriciteit

De opgegeven elektriciteitsvraag vanuit de CES zit aan de bovenkant van de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. De voorziene vraag is goed in lijn met de aannames in het scenario Nationaal leiderschap, maar wel een stuk hoger dan het scenario Europese Integratie.

Verschillen tussen CES en netbeheerders scenario's komen niet voort uit elektrolyse, plannen daarvoor zijn in lijn met de scenario's. Ook datacentra zijn geen bron van verschillen, deze zijn in deze CES buiten beschouwing gebleven.

Wat verder opvalt aan de opgegeven vraag naar elektriciteit in Noord-Nederland is dat deze nagenoeg constant is tussen 2030 en 2050, op ruim 20 TWh. Dat heeft twee oorzaken: De grootste elektrificatieslag is in 2040 wel gemaakt, richting 2050 is er nog maar minimaal extra elektriciteitsvraag voorzien door de industrie.

- Tot 2040 wordt de groei bij bedrijven die hun elektriciteitsvraag zien toenemen 'gecompenseerd' door verminderde vraag op andere plekken (Aldel is gestopt en komt daarmee niet voor in de vraag, terwijl voor Aldel wel verbruik is aangenomen in de scenario's van de netbeheerders).
- In de scenario's van de netbeheerders is aan de bovenkant van de bandbreedte veel verbruik voorzien voor de productie van synfuels. In de praktijk zijn hier momenteel nog niet veel concrete plannen voor. Dit zorgt voor een significant lagere vraag in de CES ten opzichte van de bovenkant van de bandbreedte van de doorgerekende scenario's in 2050.



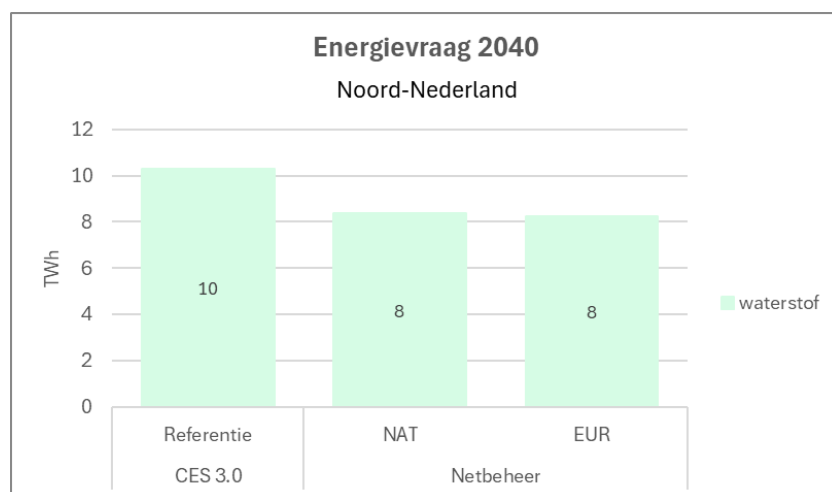
Figuur 4-10 Elektriciteitsvraag cluster Noord-Nederland 2040

#### Waterstof

De opgegeven waterstofvraag voor 2040 ligt boven de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Mogelijk is hier sprake van een overschatting door gebrek aan informatie, aangezien in de

CES3.0 voor 2030 en 2035 nog een waterstofvraag van ongeveer 6 TWh wordt verwacht en de CES aangeeft dat plannen voor na 2030 niet zijn aangeleverd, als gevolg van onzekerheid over de marktomstandigheden.

Vanuit de aangeleverde plannen van de deelnemende bedrijven komt grootschalige waterstofvraag naar voren vanaf 2026/2027. De waterstofvraag opgehaald ten behoeve van de CES in Noord-Nederland ligt in 2030 boven de bandbreedtes van de IP-scenario's. Dit is te verklaren doordat bepaalde activiteiten nu eerder op de planning staan dan ten tijde van het opstellen van de IP-scenario's. De vraag komt dus eerder.



Figuur 4-11 Waterstofvraag cluster Noord-Nederland 2040

## Aanbod energie (exclusief wind op zee)

### Elektriciteit

Het elektriciteitsaanbod in 2040 vanuit de CES valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Het aanbod bestaat uit grote centrales in het cluster en decentrale opwek. Vanaf 2035 richting 2050 wordt een afname van aanbod elektriciteit verwachten, die grotendeels wordt gedreven door het sluiten van WKKs, waaronder Delesto. Deze afname komt ook naar voren in de scenario's van de netbeheerders.

### Waterstof

Vanaf 2030 voorziet de CES een aanbod van waterstof van een kleine 20 TWh/jaar. Er zijn geen verdere plannen voor de jaren erna, waardoor het aanbod constant blijft. De doorgerekende scenario's van de netbeheerders laten nog wel een stijging in het aanbod zien. De opgegeven cijfers waterstof aanbod voor 2040 (19 TWh) liggen aan de onderkant van de bandbreedte van de doorgerekende scenario's (15 en 45 TWh)

Doordat de waterstofbehoefte volgens de ingediende plannen in 2035 lager is dan de waterstofproductie in het cluster voorziet het cluster Noord-Nederland een rol te vervullen in de levering van waterstof aan de rest van Nederland via het Waterstofnetwerk Nederland.

### Elektrolyse en overige flexbronnen

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de hoeveelheid elektrolyse in de doorgerekende scenario's, bij verschillende hoeveelheden wind op zee.

Tabel 4-4 Hoeveelheden elektrolyse in doorgerekende scenario's

Regio	Nationaal Leiderschap					Europese Integratie					
	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	Geen elektrische verbinding	1x 2GW	2x 2 GW	3x 2GW	4x 2GW	
Noord-Nederland	1000	1800	2600	3200	3900	500	900	1300	1600	2000	MW

CES Noord-Nederland heeft aan de netbeheerders aangegeven dat zij in 2040 18,1 TWh aan elektriciteitsvraag voor elektrolyzers verwachten. Dit komt overeen met ongeveer 3,5 GW aan elektrolyzers. Dit valt binnen de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, hoewel het wel sterk aan de bovenkant zit.

Kanttekening: De CES geeft in hun eigen rapportage in de CES3.0 aan uit te gaan van fors meer elektrolyse, namelijk 5,6 GW in 2040. Dit komt dus niet overeen met de eerder doorgegeven data aan de netbeheerders, die gebruikt wordt voor deze gevoeligheidsanalyse.

De plannen uit de CES zijn als volgt: Zowel in het clusterdeel Eemshaven als Delfzijl zijn concrete projecten voor elektrolyzers doorgegeven, waarbij vooral de projecten in clusterdeel Eemshaven een significant grotere aansluitingscapaciteit vragen. Dit omvat de elektrolyse projecten van RWE Eemshydrogen, HyNetherlands en North2. De gevraagde groei in aansluitcapaciteit is grotendeels het gevolg van de geplande aanlanding van wind op zee.

Voor 2030 de volgende elektrische aansluitcapaciteit verwacht:

- Eemshaven: 5.250 MW, 4 projecten
- Delfzijl: 290 MW, 5 projecten (er wordt ook nog geschreven 330 MW in Delfzijl, niet duidelijk of 290 MW dan niet klopt of dat 330 MW pas later gaat gelden).
- Emmen: 0 MW
- In totaal verwacht het cluster groene waterstofproductie met een elektrische capaciteit tot 5,6 GW, waarvan ruim 4 GW (10 TWh/jaar) uit aanlanding van wind op zee. Dit ligt 1,7 GW hoger dan de bovengrens van de doorgerekende scenario's.

## Conclusies

- De opgegeven elektriciteitsvraag vanuit de CES zit aan de bovenkant van de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. De voorziene vraag is goed in lijn met de aannames in het scenario Nationaal leiderschap, maar wel een stuk hoger dan het scenario Europese Integratie.
- De waterstofvraag die voorzien wordt in de CES ligt iets hoger dan in de doorgerekende scenario's, maar mogelijk is hier sprake van een overschatting door gebrek aan informatie
- De opgegeven cijfers waterstof aanbod voor 2040 liggen aan de onderkant van de bandbreedte van de doorgerekende scenario's. Het elektriciteitsaanbod valt binnen de bandbreedte.
- De voorziene elektrolysecapaciteit in de CES ligt aan de bovenkant van de doorgerekende scenario's. Kanttekening hierbij is dat de cijfers uit het rapport van de CES3.0 niet overeenkomen met de doorgegeven cijfers aan de netbeheerders. De cijfer uit het rapport van de CES3.0 liggen een stuk hoger. In dat geval zou de elektriciteitsvraag en het waterstofaanbod ook een stuk hoger liggen dan in de doorgerekende scenario's.

### 4.7.3 Gevoeligheidsanalyse

De cijfers vanuit de CES die doorgegeven zijn vanuit de netbeheerders zijn goed in lijn met de doorgerekende scenario's van pVAWOZ. De elektrolysecapaciteit die benoemd wordt in het rapport van de CES Noord-Nederland ligt echter een stuk hoger dan de bandbreedte van de doorgerekende scenario's, namelijk 1,7 GW hoger dan de bovengrens. Als er inderdaad een stuk meer elektrolyse gerealiseerd wordt, dan heeft dat de volgende effecten:

- Door de extra vraag naar elektriciteit van de elektrolyzers kan meer aanbod van wind op zee lokaal benut worden. Gezien het verschil (1,7 GW) lijkt er dan een extra elektrische verbinding à 2 GW ingepast te kunnen worden, aangezien we verwachten dat er een sterke correlatie is tussen de afname van elektriciteit van elektrolyzers en het aanbod van wind op zee (zie paragraaf 2.4.3).
- Er moet meer waterstof afgevoerd worden richting de rest van Nederland (het voorziene aanbod van waterstof ligt een stuk hoger dan de vraag, ook bij lagere hoeveelheden elektrolyse). Uit de analyses van Gasunie volgt dat er naar verwachting geen uitbreidingen nodig zijn aan het Waterstofnetwerk Nederland bij waterstofaanlanding en onshore elektrolyse bij de Eemshaven. Het hogere aanbod van waterstof lijkt afgevoerd te kunnen worden binnen de capaciteit van het geplande netwerk.

#### 4.7.4 Vergelijking uitkomsten systeemanalyse en verklaring verschillen

Er is door CES Noord-Nederland gekeken welke samenhang er is tussen de verschillende systeemelementen in het energiesysteem van cluster Noord-Nederland. Dit met het doel inzicht te krijgen in de haalbaarheid van de implementatiedatum van de beoogde projecten en in de vertraging die optreedt wanneer randvoorwaarden niet tijdig zijn ingevuld. Er wordt in de CES niet ingegaan op impact op afvoerende infrastructuur, zoals in de systeemanalyse van pVAWOZ.

### 4.8 Cluster 6

Het zesde cluster is een verzamelnaam voor de overige industrie verspreid door Nederland. Een update van dit cluster volgt nog. Dit zullen meerdere losse updates zijn, aangezien per provincie een provinciale CES is opgesteld voor de industrieën die onder het zesde cluster vallen.

De uitvraag van Cluster 6 maakt onder meer inzichtelijk dat een groot deel van de verduurzamingsinvesteringen niet voor 2030 kan plaatsvinden. Om de benodigde investeringen toch te kunnen doen, is (betere) planbaarheid van projecten cruciaal.

De plannen van de Cluster 6 industrie hebben slechts een beperkte invloed op de inpassing van wind op zee, om twee redenen:

- De Cluster 6 bedrijven liggen voornamelijk in het binnenland terwijl voor de inpassing van wind op zee vooral de energievraag in de buurt van de aansluitlocaties van belang is.
- De totale energievraag van de Cluster 6 bedrijven is relatief beperkt ten opzichte van de energievraag van de grote industriële clusters.

### 4.9 Onderzoek Power-to-Industry Kalavasta

In 2023 heeft Kalavasta in een onderzoek voor de werkgroep 'Power to Industry', waarin ze de elektriciteits- en netto waterstofvraag van de industrieclusters en aanlandlocaties voor wind op zee in kaart hebben gebracht, voor de periode 2030-2040. In dit onderzoek zijn bestaande scenario's voor 2040 uiteengezet, en geen nieuwe scenario's ontwikkeld. Hierin worden onder meer de ii3050 scenario's, die de basis vormen voor de analyses voor pVAWOZ, en de scenario's van de CES, waar we in dit hoofdstuk naar kijken, meegenomen. Voor deze scenario's is dus geen verdere verschillen- en gevoeligheidsanalyse nodig.

Daarnaast zijn twee scenario's vanuit de routekaart Elektrificatie in de Industrie meegenomen voor 2040, een scenario met maximale elektrificatie en een scenario met maximale toepassing van

waterstof. Deze ontwikkeling van de elektriciteitsvraag van de industrie in deze scenario's valt buiten de bandbreedte van de gehanteerde scenario's voor pVAWOZ. Dit zijn echter extreme scenario's, waarbij of maximaal in wordt gezet op elektrificatie of op waterstof. Beide scenario's zien we daarom niet als realistisch. Daarom voeren we hier geen verschillen- en gevoeligheidsanalyse voor uit.

## 5 Meer kernenergie in het energiesysteem<sup>15</sup>

### 5.1 Samenvatting

Het kabinet heeft in het coalitieakkoord van Kabinet Rutte IV het voornemen uitgesproken om kernenergie een grotere rol te geven in de Nederlandse energiemix. Dit omvat ten eerste de verlenging van de bedrijfsduur van de bestaande kerncentrale Borssele en de ontwikkeling van twee nieuwe kerncentrales. In het regeerakkoord van het kabinet Schoof is de bouw van in totaal vier nieuwe kerncentrales aangekondigd.

In de scenario's die de basis vormen voor de beoordeling Systeemintegratie, de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, wordt uitgegaan van de ontwikkeling van nieuwe kerncentrales. Maar de omvang van de ontwikkeling van kernenergie komt niet overeen met de gestelde ambities. Daarnaast wordt in deze scenario's uitgegaan van een vaste ruimtelijke verdeling, terwijl er voor de realisatie van de ambitie van de nieuwe kerncentrales gekeken wordt naar verschillende alternatieven. Daarom zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd door TenneT, met nieuwe scenario's die in lijn zijn met de bestaande onderzoeksplannen voor kernenergie en met verschillende ruimtelijke verdelingen van die kerncentrales. Hierbij is gekeken naar de vier potentiële locaties voor deze nieuwe kerncentrales bekeken: Borssele, Terneuzen, Maasvlakte en Eemshaven<sup>16</sup>.

De realisatie van grote kerncentrales heeft een wisselwerking met de aanlanding van wind op zee die in die regio mogelijk is. Dit komt doordat grote kerncentrales (bij 2 centrales gaat het om circa 3,2 GW) zorgen dat lokaal meer elektriciteit geproduceerd wordt. Dit zorgt ervoor dat meer stroom afgevoerd moet worden, wat in elke van de regio's waarvoor gekeken wordt naar grote kerncentrales (Zeeland, Zuid-Holland en Noord-Nederland) al de grootste uitdaging is voor de inpassing van meer wind op zee. Daardoor zorgt kernenergie ervoor dat de belasting op de 380kV-verbindingen door afvoer van elektriciteit hoger wordt, en dat in principe minder elektrische aanlandingen van wind op zee ingepast kunnen worden voordat grote ingrepen nodig zijn.

De conclusies van de gevoeligheidsanalyses zijn:

- In elke regio zijn minder elektrische aanlandingen inpasbaar bij realisatie van twee grote kerncentrales:
  - In Zeeland is 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep in plaats van 2. Daarvoor maakt het niet uit of de kerncentrales is Borssele of Terneuzen komen.
  - In Zuid-Holland is 0 of 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in plaats van 1 tot 3.
  - In de Eemshaven is 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in plaats van 2 tot 3.
- In het scenario Nationaal Leiderschap heeft het plaatsen van twee grote kerncentrales een groter effect op het aantal elektrische aanlandingen dat zonder grote ingreep ingepast kan worden. Dit komt naar verwachting doordat kerncentrales in dit scenario meer draaiuren maken (zie paragraaf 5.3.2) en er daarmee meer overlap is tussen de inzet van kerncentrales en uren met veel productie van wind op zee.
- Bij het scenario met in totaal vier grote kerncentrales, met ook hier twee centrales per regio, zijn de effecten voor de regio's vrijwel hetzelfde als in het scenario met in twee grote kerncentrales.

<sup>15</sup> Er is alleen gekeken naar de afhankelijkheid van realisatie van grote kerncentrales. SMR's zijn niet meegenomen in de analyses.

<sup>16</sup> Dit zijn de locaties die onderzocht worden in de projectprocedure voor de eerste twee kerncentrales.

## 5.2 Inleiding

Het kabinet heeft in het coalitieakkoord van Kabinet Rutte IV het voornemen uitgesproken om kernenergie een grotere rol te geven in de Nederlandse energiemix. Dit omvat ten eerste de verlenging van de bedrijfsduur van de bestaande kerncentrale Borssele en de ontwikkeling van twee nieuwe kerncentrales. In het regeerakkoord van het kabinet Schoof is de bouw van in totaal vier nieuwe kerncentrales aangekondigd.

In de scenario's die de basis vormen voor de beoordeling Systeemintegratie, de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, wordt uitgegaan van de ontwikkeling van nieuwe kerncentrales. Maar de omvang van de ontwikkeling van kernenergie komt niet overeen met de gestelde ambities. Daarnaast wordt in deze scenario's uitgegaan van een vaste ruimtelijke verdeling, terwijl er voor de realisatie van de ambitie van de nieuwe kerncentrales gekeken wordt naar verschillende alternatieven (zie Tabel 5-1). Daarom zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd door TenneT, met nieuwe scenario's die in lijn zijn met de bestaande plannen voor kernenergie en met verschillende ruimtelijke verdelingen van die kerncentrales.

Tabel 5-1 Uitgangspunten kernenergie in verschillende scenario's

	Totaal vermogen kernenergie	In Zeeland	In Rotterdam	In Eemshaven
Nationale Drijfveer	1,5 GW	1,1 GW	0,4 GW	0 GW
Europese Integratie	4,0 GW	2,0 GW	2,0 GW	0 GW
Gevoeligheidsanalyse – 2 nieuwe kerncentrales	3,7 GW	Verschillende varianten		
Gevoeligheidsanalyse – 4 nieuwe kerncentrales <sup>17</sup>	6,9 GW	Verschillende varianten		

Deze gevoeligheidsanalyses bestaan uit twee onderdelen:

- **Marktmodellering.** Bij deze analyse wordt de elektriciteitsmarkt in Nederland en de rest van Europa gemodelleerd. Op basis hiervan wordt bepaald op welke momenten de kerncentrales ingezet worden en wat de impact hiervan is op de balans van vraag en aanbod, inzet van flexibiliteitsbronnen en import/export van elektriciteit. Deze analyse gebeurt op het niveau van biedzones, wat betekent dat Nederland als geheel beschouwd wordt. Deze analyse is input voor de netdoorrekeningen.
- **Netdoorrekeningen.** Bij deze analyse wordt de impact van de scenario's op de hoogspanningsinfrastructuur op land (380kV) bepaald, middels een integrale doorrekening.

In de volgende paragraaf bespreken we in meer detail welke configuratie voor kernenergie doorgerekend zijn.

## 5.3 Uitgangspunten

### 5.3.1 Doorgerekende configuraties

Er zijn configuraties doorgerekend met twee nieuwe kerncentrales en configuraties met vier nieuwe kerncentrales, met 1,6 GW per centrale<sup>18</sup>. In elk van deze configuraties is ook bedrijfsduurverlening

<sup>17</sup> In de [Voortgangsbrief nieuwbouw kernenergie mei 2025](#) wordt benoemd dat de eerste twee kerncentrales pas eind jaren '30 gereed kunnen zijn. Daarmee lijkt dit scenario met vier centrales in 2040 zeer uitdagend.

<sup>18</sup> Er wordt door de overheid gesproken met verschillende ontwikkelaars, met elk een eigen ontwerp. Deze verschillende ontwerpen hebben elk een ander vermogen, tussen de 1 GW en 1,6 GW per stuk. Voor deze analyse zijn we uitgegaan van het ontwerp met het hoogste vermogen om zo de 'worst-case' te onderzoeken.

van de bestaande kerncentrale in Borssele (485 MW) meegenomen. Het gaat dus om 3,7 GW aan kernenergie bij twee nieuwe centrales en 6,9 GW bij vier nieuwe centrales.

Er zijn vier locaties voor deze nieuwe kerncentrales bekeken: Borssele, Terneuzen, Maasvlakte en Eemshaven<sup>19</sup>. Daarbij zijn de volgende configuraties doorgerekend:

- Twee centrales in Borssele
- Twee centrales in Terneuzen
- Twee centrales op Maasvlakte
- Twee centrales in Eemshaven
- Twee centrales in Borssele en twee op Maasvlakte (vier centrales in totaal)
- Twee centrales in Borssele en twee in Eemshaven (vier centrales in totaal)

Deze configuraties zijn doorgerekend voor beide energetische scenario's: Nationaal Leiderschap en Europese Integratie. Zo wordt de impact van kernenergie bij verschillende ontwikkelingen van het energiesysteem onderzocht. Deze scenario's hebben verschillende hoeveelheden overige opwek, energievraag en flexibiliteit. In beide energetische scenario's wordt uitgegaan van realisatie van de onderzoeksopgave van pVAWOZ (50 GW wind op zee in 2040 met 10 nieuwe elektrische verbindingen en 9 GW offshore elektrolyse). Ten opzichte van de basisscenario's voor de analyses van pVAWOZ zijn de energievraag en de vermogens voor productie (met uitzondering van kernenergie), bronnen van flexibiliteit en interconnectie in deze energetische scenario's gelijk. De uurlijkse inzet van productie- en flexibiliteitsbronnen en de uitwisseling met het buitenland verandert wel door de aanpassing van de vermogens aan kernenergie. Dit wordt berekend in de marktanalyse (zie paragraaf 5.3.2).

In de basisanalyses zijn vijf configuraties voor de elektrische aanlanding van wind op zee doorgerekend (zie paragraaf 1.1). De gevoeligheidsanalyses voor kernenergie zijn gedaan voor één aanlandconfiguratie, de aanlandconfiguratie Ruimtelijke Optimalisatie, om het aantal configuraties dat doorgerekend moet worden te beperken.

In totaal zijn er vier scenario's waarvoor de marktmodellering gedaan is (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie, elk met twee en met vier kerncentrales, zie ook Tabel 5-1) en twaalf aanvullende configuraties waarvoor netdoorrekeningen uitgevoerd zijn (vier locaties met twee centrales en twee configuraties met vier centrales, voor zowel Nationaal Leiderschap als Europese Integratie).

### 5.3.2 Inzet kernenergie en impact op vraag en aanbod energie

In de marktmodellering is elektriciteitsmarkt van Nederland en omliggende landen en daarmee de inzet van productie- en flexibiliteitsbronnen en de uitwisseling van elektriciteit tussen landen bepaald. Deze marktmodellering is input voor de netdoorrekeningen.

Zoals eerder besproken is de marktmodellering gedaan voor twee energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie) en voor de situatie met twee en vier grote kerncentrales. Belangrijke aannames bij deze scenario's zijn:

---

<sup>19</sup> Dit zijn de locaties die onderzocht worden in de projectprocedure voor de eerste twee kerncentrales.

- Het vermogen aan kernenergie verandert, maar het opgesteld vermogen van andere productiebronnen blijft gelijk<sup>20</sup>. In de meeste gevallen (met uitzondering van Europese Integratie met 2 kerncentrales) neemt het vermogen aan kernenergie toe ten opzichte van de basisscenario's. Dat betekent dat de totale productie van elektriciteit toeneemt.
- De inzet van flexibiliteitsbronnen en uurlijkse uitwisseling met het buitenland verandert, maar het opgesteld vermogen blijft gelijk. In de praktijk is het wel aannemelijk dat een verandering van het aantal kerncentrales leidt tot een andere hoeveelheid flexibiliteit (minder andere regelbare gascentrales, meer flexibiliteit voor overschotten zoals elektrolyse).

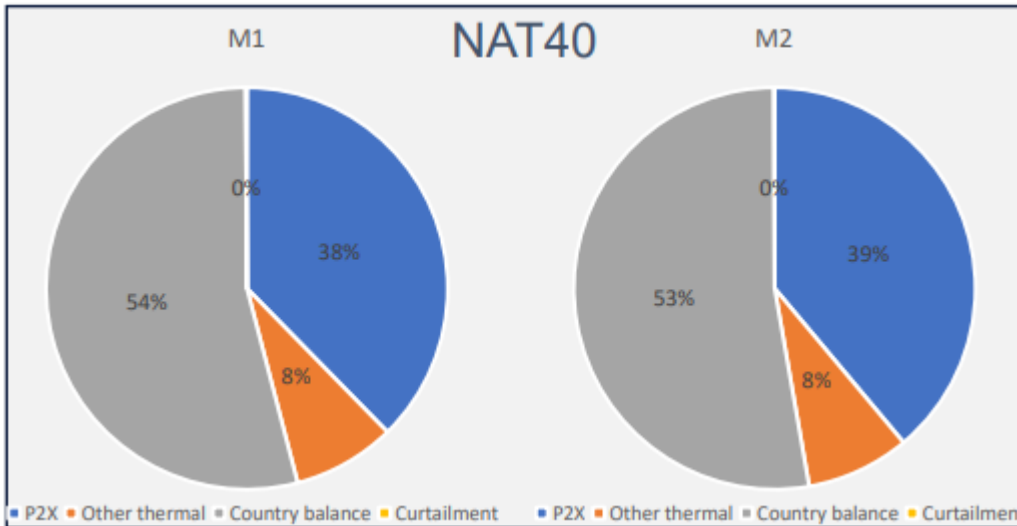
De marktmodellering bepaalt zoals eerder benoemd de inzet van de kerncentrales. Hierbij wordt uitgegaan van flexibele inzet van de kerncentrales in de merit-order<sup>21</sup>. Kerncentrales hebben relatief lage marginale kosten en staan daarmee laag in de merit-order, maar ze staan wel hoger dan hernieuwbare opwek. Dit betekent dat kerncentrales niet ingezet wordt op momenten dat hernieuwbare bronnen al de volledige vraag in kunnen vullen. Uit de marktmodellering volgt dat de kerncentrales in het scenario Nationaal Leiderschap circa 5.500 vollasturen maken (capaciteitsfactor 65%) en in het scenario Europese Integratie circa 4.600 vollasturen (capaciteitsfactor 55%). Het aantal uren inzet ligt hoger bij het scenario Nationaal Leiderschap vanwege de hogere elektriciteitsvraag en het grotere vermogen aan flexibele bronnen. Het aantal uren inzet van de centrales is niet significant verschillend tussen het scenario met twee centrales en vier centrales.

De onderstaande figuren laten zien waar de additionele productie van de kerncentrales voor gebruikt worden. Hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

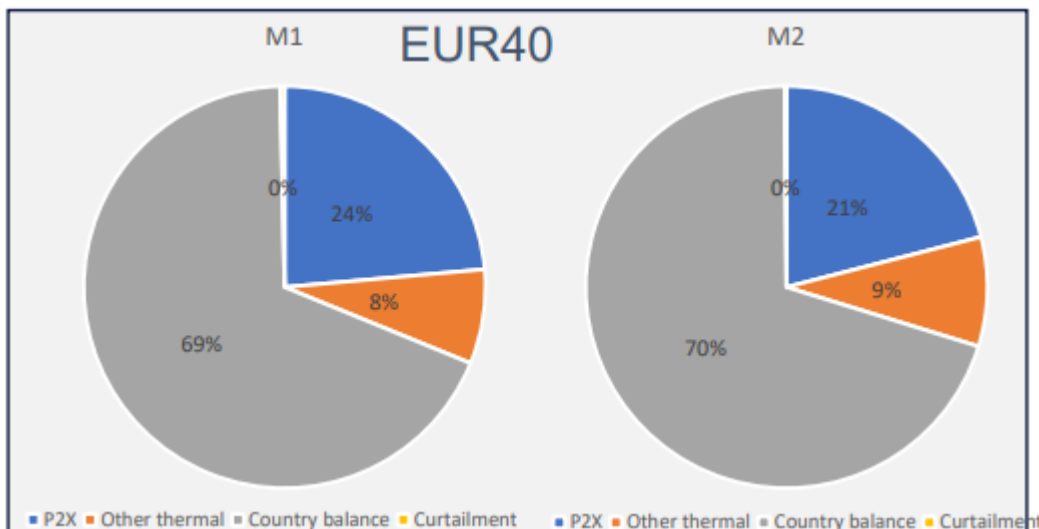
- Een groot deel van de extra productie van kerncentrales wordt geëxporteerd: ruim 50% bij Nationaal Leiderschap en ongeveer 70% bij Europese Integratie. Dit geldt zowel bij 2 nieuwe kerncentrales (3,7 GW in totaal) als bij 4 nieuwe kerncentrales (6,9 GW in totaal).
- Daarnaast wordt een aanzienlijk deel van de extra productie van de kerncentrales benut door meer inzet van elektrolyse en power-to-heat (40% bij Nationaal Leiderschap en 20-25% bij Europese Integratie). Als er minder vermogen van deze flexibele bronnen beschikbaar is, dan wordt nog een groter deel van de extra productie geëxporteerd. Daarnaast is er dan meer curtailment en maken de kerncentrales minder draaiuren.
- Tot slot leidt de extra productie van de kerncentrales tot minder inzet van andere regelbare centrales. Hiervoor wordt ongeveer 10% van de extra productie van de kerncentrales voor benut.
- Doordat de kerncentrales flexibel ingezet worden in de merit-order leidt dit niet tot meer curtailment. Als kerncentrales vollast ingezet worden is dit wel het geval.
- In het scenario Nationaal Leiderschap wordt een groter deel van de extra productie van kerncentrales binnenlands benutten met elektrolyse en power-to-heat. Dit komt doordat er in dit scenario grotere vermogens van deze bronnen staan.
- Het aandeel van de extra productie dat ten goede komt aan export, flexibele vraag en minder inzet van andere regelbare centrales is vrijwel gelijk bij de scenario's met twee en vier kerncentrales.

<sup>20</sup> Dit is een aanname van de modellering. In werkelijkheid kan realisatie van meer kerncentrales er wel toe leiden dat minder andere productiebronnen gerealiseerd (hoeven te) worden.

<sup>21</sup> Hierbij worden productie-installaties van elektriciteit ingezet op basis van hun marginale kosten. De productiebronnen met de laagste marginale kosten worden ingezet en de marginale kosten van de duurste bron die draait bepaalt de prijs. Dit is ook hoe de elektriciteitsmarkt momenteel werkt.



Figuur 5-1 Benutting additionele productie kernenergie – scenario Nationaal Leiderschap, met twee kerncentrales (links) en vier kerncentrales (rechts)



Figuur 5-2 Benutting additionele productie kernenergie – scenario Europese Integratie, met twee kerncentrales (links) en vier kerncentrales (rechts)

#### 5.4 Impact op mogelijkheden aanlanding binnen regio's

De realisatie van grote kerncentrales heeft impact voor de mogelijkheden voor wind op zee die in die regio mogelijk is. Dit komt doordat grote kerncentrales (bij 2 centrales gaat het om 3,2 GW) zorgen dat lokaal meer elektriciteit geproduceerd wordt. Dit zorgt ervoor dat meer stroom afgevoerd moet worden, wat in elke van de regio's waarvoor gekeken wordt naar grote kerncentrales (Zeeland, Zuid-Holland en Noord-Nederland) al de grootste uitdaging is voor de inpassing van meer wind op zee. Daardoor zorgt kernenergie ervoor dat de belasting op de 380kV-verbindingen door afvoer van elektriciteit hoger wordt, en dat in principe minder elektrische aanlandingen van wind op zee ingepast kunnen worden voordat grote ingrepen nodig zijn.

Het is niet zo dat kernenergie en wind op zee direct inwisselbaar zijn, en dat 1 GW kernenergie ervoor zorgt dat 1 GW minder wind op zee mogelijk is. Dit heeft twee redenen:

**Verschillen- en gevoeligheidsanalyses - Bijlage beoordeling Systemintegratie Programma VAWOZ, versie 5.1 - Definitief**

- Kernenergie heeft een ander inzetprofiel dan wind op zee. Het inzetprofiel van kerncentrales is (binnen technische grenzen) stuurbaar, terwijl dat voor wind op zee niet het geval is. Kerncentrales zullen vaak draaien op momenten met weinig productie van wind op zee en uitstaan op momenten dat er grote overschotten zijn door wind op zee. Met die inzet zorgen kerncentrales er niet voor dat minder wind op zee ingepast kan worden. Maar er zullen ook momenten zijn dat de kerncentrales wel draaien, terwijl er ook veel productie is van wind op zee. Deze overlap tussen inzet van kerncentrales en veel productie van wind op zee (met name op momenten met relatief weinig vraag) zorgt ervoor dat meer stroom afgevoerd moet worden en bepaalt daarmee in welke mate kernenergie ervoor zorgt dat minder elektrische aanlanding van wind op zee ingepast kan worden.
- Zoals besproken in de vorige paragraaf leidt het extra vermogen aan kerncentrales tot meer inzet van flexibele bronnen, zoals elektrolyzers en power-to-heat, en daarmee tot meer lokale vraag. Deze flexibele bronnen bevinden zich ook deels in de regio's waar kerncentrales komen. Daardoor wordt een deel van de extra productie door extra lokale vraag geabsorbeerd en wordt effect van meer lokale productie deels gedempt.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van het aantal elektrische aanlandingen dat ingepast kan worden zonder grote ingrepen in de drie regio's waarnaar gekeken wordt voor de twee grote kerncentrales. Daarbij vergelijken we de resultaten van de basisscenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie) met de gevoeligheidsanalyse met twee grote kerncentrales in die regio.

Tabel 5-2 Impact kerncentrales op mogelijkheden inpassing elektrische aanlanding

Aantal aanlandingen inpasbaar (à 2 GW), zonder grote ingrepen	Nationaal Leiderschap – Basis	Nationaal Leiderschap – twee grote kerncentrales	Europese Integratie – Basis	Europese Integratie – twee grote kerncentrales
Zeeland (Borssele of Terneuzen)	2	1	2	1
Rotterdam	2 tot 3	0 tot 1	1 tot 2	0 tot 1
Eemshaven	2	1	3	1

De conclusies uit de netdoorrekeningen zijn:

- In elke regio zijn minder elektrische aanlandingen inpasbaar bij realisatie van twee grote kerncentrales:
  - In Zeeland is 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep in plaats van 2. Daarvoor maakt het niet uit of de kerncentrale is Borssele of Terneuzen komen.
  - In Zuid-Holland is 0 of 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in plaats van 1 tot 3.
  - In de Eemshaven is 1 aanlanding inpasbaar zonder grote ingreep, in plaats van 2 tot 3.
- In het scenario Nationaal Leiderschap heeft het plaatsen van twee grote kerncentrales een groter effect op het aantal elektrische aanlandingen dat zonder grote ingreep ingepast kan worden. Dit komt naar verwachting doordat kerncentrales in dit scenario meer draaiuren maken (zie paragraaf 5.3.2) en er daarmee meer overlap is tussen de inzet van kerncentrales en uren met veel productie van wind op zee.
- Bij het scenario met in totaal vier grote kerncentrales, met ook hier twee centrales per regio, zijn de effecten voor de regio's vrijwel hetzelfde als in het scenario met in twee grote kerncentrales. Het plaatsen van twee extra centrales in Nederland zorgt niet voor een extra beperkingen op de mogelijke inpasbare elektrische aanlanding, door bijvoorbeeld cumulatieve effecten op het netwerk in het binnenland.

## 5.5 Beschouwing op impact inzetprofiel kerncentrales

In de marktmodellering is uitgegaan van merit-order inzet van kerncentrales, binnen de technische beperkingen voor op- en afschalen van deze centrales. Hierbij worden kerncentrales ingezet op momenten dat de prijzen hoog genoeg zijn om de marginale kosten terug te verdienen. Het is echter ook een mogelijkheid dat een kerncentrale must-run gaat draaien. Ofwel omdat de kapitaalkosten dominant zijn en het daarmee wenselijk wordt ofwel omdat een kerncentrale technisch gezien toch minder flexibel ingezet kan worden dan nu gedacht. Hieronder bespreken we de effecten van must-run inzet. We zien de merit-order inzet, die in de netdoorrekeningen meegenomen is, als de meest realistische inzet, aangezien een kerncentrale nauwelijks extra inkomsten krijgt door inzet op de uren met hele lage prijzen.

In de marktmodellering is door TenneT een doorrekening gemaakt van de effecten van must-run inzet van de kerncentrales op de nationale balans van vraag en aanbod. Daarbij is aangenomen dat kerncentrales op minimaal 75% van de maximale capaciteit moeten draaien, met uitzondering van periodes van onderhoud. Dit leidt ertoe dat de capaciteitsfactor van de kerncentrales toeneemt en deze meer elektriciteit produceren. Die extra productie leidt onder meer tot meer curtailment van hernieuwbare opwek en tot meer inzet van flexibele bronnen.

Er is geen netdoorrekening gemaakt met een must-run inzet van kerncentrales, dus dit is niet kwantitatief bepaald. Maar kwalitatief verwachten we de volgende effecten van must-run inzet op de belasting op het elektriciteitsnet en de inpassing van wind op zee:

- Er zal naar verwachting meer overlap zijn tussen de inzet van de kerncentrales en veel productie van wind op zee. Daardoor zal de belasting op de 380kV-verbindingen door afvoer van lokale overschotten naar verwachting groter worden. Er kunnen hierdoor meer momenten zijn met overbelasting ontstaan, maar de maximale piek invoeding zal naar verwachting niet veel toenemen (omdat er ook met merit-order inzet van kerncentrales al uren zijn met overlap tussen inzet van beide bronnen).
- Meer inzet van kerncentrales leidt ook tot meer curtailment van hernieuwbare opwek en meer inzet van flexibele bronnen (zoals elektrolyse). Dit zal het effect van meer lokale productie deels mitigeren.
- Concluderend zal must-run inzet van kerncentrales ertoe leiden dat de combinatie van wind op zee en kernenergie tot meer belasting op de 380kV-verbindingen leidt. Dit kan ertoe leiden dat minder elektrische aanlanding van wind op zee inpasbaar is zonder grote ingrepen. Hoe groot dit effect is, is onzeker. Dit effect kan gemitigeerd worden door alternatieve transportrechten of door op een andere wijze eisen te stellen aan de inzet van kerncentrales.

## 6 Overige verschillen- en gevoeligheidsanalyses

### 6.1 Aanlanding in Lelystad

#### 6.1.1 Introductie en uitgangspunten

In pVAWOZ wordt op dit moment niet naar Lelystad als potentiële aansluitlocatie voor wind op zee voor de periode 2031-2040 gekeken. Er is echter wel inzicht gewenst over de mogelijkheid en wenselijkheid van aanlanding in Lelystad, vanuit systeemintegratie. Om hier antwoord op te geven heeft TenneT aanvullende doorrekeningen gedaan.

Daarbij zijn twee variaties doorgerekend op de aanlandconfiguratie Ruimtelijke optimalisatie: één waarbij een aanlanding van 2 GW in Lelystad gerealiseerd wordt in plaats van bij de Eemshaven en één waarbij een aanlanding van 2 GW in Lelystad gerealiseerd wordt in plaats van Noord-Holland Noord. De elektrische aanlanding van wind op zee bij de configuratie Ruimtelijke optimalisatie en de twee varianten met aanlanding in Lelystad is weergegeven in Beide variaties zijn doorgerekend voor zowel het scenario Nationaal Leiderschap als het scenario Europese Integratie.

Tabel 6-1 Aanlandconfiguraties elektrische aanlanding – gevoeligheidsanalyse aanlanding in Lelystad

Configuratie	Ruimtelijke optimalisatie	Ruimtelijke optimalisatie – gevoeligheid aanlanding Lelystad ipv Eemshaven	Ruimtelijke optimalisatie – gevoeligheid aanlanding Lelystad ipv NH-noord
Eemshaven	2 GW	0 GW	2 GW
Noord-Holland Noord	4 GW	4 GW	2 GW
Noord-Holland Zuid	2 GW	2 GW	2 GW
Rotterdam	2 GW	2 GW	2 GW
Zeeland	2 GW	2 GW	2 GW
Moerdijk/G'berg	4 GW	4 GW	4 GW
Tilburg	0 GW	0 GW	0 GW
Limburg	4 GW	4 GW	4 GW
Lelystad	0 GW	2 GW	2 GW

#### 6.1.2 Resultaten

Uit de netdoorrekeningen van de gevoeligheidsanalyses voor aanlanding in Flevoland kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Aanlanding in Lelystad in plaats van de Eemshaven heeft weinig impact op de knelpunten en benodigde ingrepen aan de HS-verbindingen. Dit komt ook doordat deze analyse gedaan is voor een configuratie met weinig aanlanding in de Eemshaven. Bij meer aanlanding in de Eemshaven kan het verplaatsen van één aanlanding naar Flevoland wel een gunstig effect hebben.
- Aanlanding in Lelystad in plaats van de Kop van Noord-Holland leidt tot iets grotere knelpunten aan de HS-verbindingen tussen Lelystad en Diemen, en heeft daarmee een negatieve impact op de belasting van die HS-verbindingen. Hierdoor is naar verwachting meer redispatch (beperkte ingreep) nodig op enkele verbindingen.

## 6.2 Geen netuitbreiding Randstad

### 6.2.1 Introductie en uitgangspunten

In de analyses wordt uitgegaan van realisatie van een nieuwe 380kV-verbinding door de Randstad vanaf Zuid-Holland naar het Noordzeekanaalgebied. Deze is opgenomen in het investeringsplan en er wordt nu onderzoek naar gedaan door TenneT, maar er is nog geen definitieve investeringsbeslissing over genomen en het is een complexe verbinding. Daarom is (tijds) realisatie van de verbinding nog onzeker.

Om in te schatten wat de impact van vertraging of het niet realiseren van deze verbinding is op de inpassing van wind op zee, heeft TenneT extra doorrekeningen gedaan waar deze uitbreiding aan het hoogspanningsnet niet meegenomen wordt. Dit heeft impact op de mogelijkheden voor aanlanding in de kop van Noord-Holland, Noord-Holland Zuid en Zuid-Holland. Voor de mogelijkheden voor aanlanding in de overige regio's heeft dit geen impact.

Deze doorrekeningen zijn gedaan voor twee configuraties (Ruimtelijke optimalisatie en Spreiding zonder Eemshaven), en voor beide energetische scenario's (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie). In totaal gaat het dus om vier doorrekeningen. Onderstaande tabel geeft de hoeveelheid aanlanding (in de periode 2031-2040) aan voor de regio's Kop van Noord-Holland, Noord-Holland Zuid en Zuid-Holland.

Tabel 6-2 Aanlandconfiguraties elektrische aanlanding Noord- en Zuid-Holland

Regio	Ruimtelijke optimalisatie	Spreiding zonder Eemshaven
Kop van Noord-Holland	4 GW	2 GW
Noord-Holland Zuid	2 GW	2 GW
Zuid-Holland	2 GW	6 GW

Deze gevoeligheidsanalyse heeft geen impact op de nationale balans van vraag en aanbod, aangezien er alleen een wijziging is aan de beschikbare transportcapaciteit.

### 6.2.2 Resultaten

Uit de doorrekening van de vier scenario's zonder de netuitbreiding in de Randstad volgt dat dan in zowel Noord- als Zuid-Holland elektrische aanlanding uitdagend wordt. Er lijkt in dat geval nog één elektrische aanlanding mogelijk in de kop van Noord-Holland en één elektrische aanlanding in Noord-Holland Zuid óf Zuid-Holland.

## 6.3 Vollaasturen wind op zee

### 6.3.1 Introductie

De windparken op zee die gerealiseerd moeten worden in de periode 2031-2040 liggen verder uit de kust dan de windparken die nu gerealiseerd worden. Dit kan effect hebben op de vollaasturen van de windparken op zee. Bij deze verschillen- en gevoeligheidsanalyse geven we een beschouwing op de ontwikkeling van de vollaasturen (verschillenanalyse). Vervolgens geven we een beschouwing op de impact hiervan op de inpassing van wind op zee (gevoeligheidsanalyse).

### 6.3.2 Beschouwing op ontwikkeling vollaasturen windparken op zee

Er worden in de doorgerekende scenario's aannames gemaakt over het aantal vollaasturen van windparken op zee. Hier wordt uitgegaan van ongeveer 4.750 vollaasturen per jaar. Dit is op basis van windmetingen op de Noordzee voor een gemiddeld weerjaar (2012), met een correctie voor verwachte klimaatverandering.

Er is echter onzekerheid over de ontwikkeling van het aantal vollaasturen voor de windparken waar in pVAWOZ naar gekeken wordt, met name voor windgebied 6/7 dat verder uit de kust ligt. Er zijn verschillende effecten te verwachten die impact hebben op het aantal vollaasturen:

- Bij een groter windgebied zullen de wake losses<sup>22</sup> groter zijn. Naast de wake losses van losse windparken zullen er aanvullende verliezen zijn door invloed van andere windparken. Uit onderzoek volgt dat dit bij een windgebied van vier windparken van 1 GW leidt tot 3 – 6 % extra verliezen, ten opzichte van een enkel windpark (ECN & TNO, 2019). In het gebied 6/7 kan in de toekomst mogelijk meer dan 20 GW gerealiseerd worden, dus zullen de extra verliezen door wake effecten nog groter zijn. Hoe groot deze extra verliezen zijn is ook afhankelijk van de dichtheid van de windparken en het aantal windmolens dat in de dominante windrichting staat.
- Daartegenover staat dat er in de gebieden verder uit de kust, zoals windgebied 6/7, meer opbrengst gehaald kan worden door meer winduren. Dit zorgt voor meer vollaasturen voor windparken in dit gebied.

Ontwikkelaars kunnen met specifieke ontwerpkeuzes, zoals de dimensionering van de generator ten opzichte van de turbine en de locaties van de windmolens, ook nog invloed uitoefenen op het aantal vollaasturen. Maar de verwachting is dat het netto-effect is dat het aantal vollaasturen van windparken in gebied 6/7, ten opzichte van de huidige parken, lager ligt.

In de volgende paragraaf bespreken we de impact van het aantal vollaasturen op de inpassing van wind op zee in het energiesysteem.

### 6.3.3 Impact op inpassing wind op zee

De exacte impact van een ander aantal vollaasturen op het energiesysteem en de inpassing van wind op zee is afhankelijk van de verandering van het aantal vollaasturen, maar is ook afhankelijk van de wijze waarop het productieprofiel verandert. Het aantal vollaasturen kan minder worden doordat er minder uren met maximale productie, maar ook doordat de productie op momenten met weinig wind afneemt. Er zijn dus grofweg twee manieren waarop de vollaasturen kunnen wijzigen:

- Minder vollaasturen door minder uren maximale productie
- Minder vollaasturen door minder productie op uren met weinig wind

Op basis van huidige onderzoeken is er onvoldoende inzicht om te bepalen hoe het aantal vollaasturen gaat wijzigen, daarom geven we een beschouwing op de impact op de inpassing van wind op zee bij elk van deze twee opties.

#### Impact op nationale balans vraag en aanbod

Als het aantal vollaasturen van de windparken op zee verder op zee afwijkt, dan betekent dat de productie per windmolen groter of kleiner wordt (afhankelijk van het effect op de vollaasturen). Daarmee heeft het impact op de uurlijkse balans van vraag en aanbod, en de inzet van bronnen van flexibiliteit. De verwachte impact op de energiebalans is:

---

<sup>22</sup> Dit zijn verliezen die ontstaan als meerdere windmolens, op windmolenparken, in nabijheid van elkaar worden geplaatst. De snelheid van de wind wordt minder achter een windmolen. Er ontstaan dan verliezen doordat windmolens de wind van elkaar als het ware "blokkeren".

- Bij **minder vollasturen door minder uren met maximale productie** zullen de overschotten van elektriciteit naar verwachting afnemen. Dit betekent minder inzet van bronnen die kunnen zorgen voor flexibele vraag, zoals elektrolyzers en power-to-heat. Daarnaast kan de export mogelijk afnemen. De impact op de tekorten naar elektriciteit zal naar verwachting beperkt zijn, aangezien er doorgaans geen tekorten zijn op momenten met relatief veel wind.
- Bij **minder vollasturen door minder productie op uren met weinig wind** zullen de tekorten van elektriciteit toenemen. Dit betekent dat naar verwachting meer inzet van waterstofcentrales en mogelijk ook meer import noodzakelijk is. Daarnaast nemen mogelijk ook de overschotten naar elektriciteit af.

Bovenstaande (potentiële) effecten zijn op basis van de aanname dat het opgesteld vermogen aan windmolens op zee gelijk blijft. Een veranderend aantal vollasturen kan echter ook impact hebben op de maatschappelijk optimale hoeveelheid wind op zee en verhouding tussen elektrische aanlanding en waterstofaanlanding.

### **Impact op mogelijkheden aanlanding binnen regio's**

Ook het effect van een ander aantal vollasturen op de netimpact van wind op zee, en de mogelijkheden voor elektrische aanlanding binnen regio's, is afhankelijk van het aantal vollasturen en de wijze waarop het productieprofiel verandert. De primaire knelpunt die op het hoogspanningsnet (kunnen) ontstaan door aanlanding van wind op zee ontstaan door afvoer van elektriciteit vanaf aansluitlocaties aan de kust op moment veel wind.

Dit betekent dat een veranderd productieprofiel en aantal vollasturen op de volgende manier impact heeft op de mogelijkheden voor aanlanding binnen regio's:

- Als het productieprofiel alleen verandert op momenten met weinig wind (minder productie op die uren), dan zal dit naar moment weinig effect hebben op de inpassing van wind op zee. Dit komt doordat dit niet de uren zijn waarop de primaire knelpunten op het hoogspanningsnet door wind op zee ontstaan.
- Als het productieprofiel verandert op de momenten met veel wind (minder uren met maximale invoeding), dan kan dit wel impact hebben. Het aantal uur met knelpunten door afvoer van elektriciteit kan veranderen, en daarmee ook de hoeveelheid elektriciteit die niet getransporteerd kan worden (ENT = Energy Not Transported). De piekbelasting voor invoeding van wind op zee blijft echter gelijk. Daarom verwachten we dat de potentiële impact op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast kan worden beperkt is.

Concluderend is het effect van het realiseren van windparken verder op zee op zowel het aantal vollasturen als het productieprofiel onduidelijk en kan het aantal vollasturen zowel hoger als lager uitvallen. In beide gevallen verwachten we dat de impact op het aantal elektrische verbindingen dat per regio ingepast kan worden beperkt is.

## **6.4 Nieuwe scenario's Netbeheer Nederland**

De analyses voor Systemintegratie zijn gebaseerd op de ii3050 scenario's uit 2023 (Netbeheer Nederland, 2023b). Ondertussen hebben de netbeheerders nieuwe scenario's opgesteld voor 2040 (Netbeheer Nederland, 2025). Deze nieuwe scenario's zijn een update van de scenario's uit 2023. De scenario's worden gebruikt voor de nieuwe investeringsplannen van de netbeheerders. Daarnaast worden deze scenario's gebruikt voor het nieuwe Programma Energiehoofdstructuur. Daarin zal ook gekeken worden naar de effecten van wind op zee op (de benodigde ruimte) voor het energiesysteem op land.

Voor deze nieuwe scenario's zijn op het moment van het schrijven van dit rapport nog geen netdoorrekeningen uitgevoerd. Daarnaast zijn er op dit moment nog geen regionalisaties van de nieuwe scenario's beschikbaar. Daarmee is het nog niet mogelijk om te bepalen wat de impact is van deze nieuwe scenario's op de conclusies over de effecten van aanlanding van wind op zee op de energie-infrastructuur op land.

In de tabel hieronder geven we wel een overzicht in het verschil in aannames van de ii3050 scenario's uit 2023, die de basis vormen voor het onderzoek Systeemintegratie van pVAWOZ, en de nieuwe scenario's van Netbeheer Nederland. Hierbij geven we een overzicht van de bandbreedte in de scenario's voor 2040, voor de belangrijkste aspecten voor de inpassing van wind op zee.

Tabel 6-3 Vergelijking aannames scenario's ii3050 uit 2023 en Netbeheer Nederland scenario's 2025

	ii3050 scenario's 2023 (basis voor beoordeling Systeemintegratie) – bandbreedte scenario's 2040	Netbeheer Nederland scenario's 2025 – bandbreedte scenario's 2040
Elektriciteitsvraag totaal	230 – 327 TWh	295 – 442 TWh
Waarvan industrie	67 – 88 TWh	67 – 111 TWh
Waterstofvraag totaal	78 – 142 TWh	63 – 121 TWh
Elektrolyse op land	8 – 17 GW	7 – 12 GW
Elektrolyse op zee	0 – 9 GW	2 – 10 GW
Kernenergie	0 – 4 GW	0 – 4 GW

Het grootste verschil bij de nieuwe scenario's is dat er wordt uitgegaan van een fors hogere elektriciteitsvraag in 2040. Ook de bovengrens van de elektriciteitsvraag van de industrie, wat een indicatie geeft van de lokale vraag bij de aanlandregio's Zeeland, Zuid-Holland, Noord-Nederland en Noord-Holland Zuid, ligt een stuk hoger. De hogere elektriciteitsvraag heeft als consequentie dat naar verwachting meer productie van windparken op zee lokaal benut kan worden, en dat er mogelijk meer aanlanding mogelijk is per regio. Maar zoals eerder benoemd is het nog niet mogelijk om goed in te schatten wat de effecten hiervan op de conclusies over de inpassing van wind op zee zijn, aangezien er nog geen regionalisatie van de scenario's en netdoorrekening gedaan is.

## 6.5 Target Grid

Met Target Grid heeft TenneT een visie ontwikkeld op de ontwikkeling van hun hoogspanningsnetten, voorbij de zichtperiode van hun investeringsplannen en richting een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Het doel hiervan is zorgen dat TenneT op tijd klaar is voor de ontwikkelingen na de tijdshorizon van hun investeringsplannen (10 jaar) en al voorbereidingen kan treffen voor cruciale projecten.

In Target Grid heeft TenneT (globale) plannen opgenomen voor uitbreidingen van hun hoogspanningsnet na 2035, maar dit zijn geen plannen waarvoor reeds een investeringsbeslissing is genomen en ze zijn vaak ook nog niet concreet uitgewerkt. Dit zal uiteindelijk in het investeringsplan gebeuren. Maar het is onwaarschijnlijk dat deze plannen dan voor 2040 gerealiseerd zullen zijn. Daarnaast benoemt TenneT dat Target Grid een dynamische strategie is, waar nog dingen in kunnen wijzigen. Dat is de reden dat plannen uit Target Grid niet meegenomen zijn in de netdoorrekeningen van TenneT, die uitgevoerd zijn voor de beoordeling Systeemintegratie. Maar hieronder gaan we wel op de plannen van Target Grid en de potentiële effecten op de aanlanding van wind op zee in. Bij het thema *Toekomstvastheid*, waar een doorkijk wordt gedaan richting 2050, wordt Target Grid ook behandeld.

De ontsluiting van de windparken op de Noordzee is een van de belangrijke uitdagingen waar binnen Target Grid naar gekeken wordt. In deze verschillen- en gevoeligheidsanalyse zullen we de belangrijkste projecten die TenneT in Target Grid voorziet bespreken, en ingaan op de (potentiële) impact van de inpassing van wind op zee.

De belangrijkste projecten die in Target Grid benoemd worden, die relevant zijn voor pVAWOZ zijn:

- Corridor met veel elektriciteitstransport van West-Nederland naar Zuid-Oost Nederland door wind op zee. Dit is de reden dat we in ons onderzoek kijken naar diepe aanlanding in Limburg. In Target Grid voorziet TenneT ook uitbreiding van het bovengrondse AC-netwerk vanaf West-Nederland naar Limburg.
- Gelijkstroomnet in Nederland met een DC-hub bij de Maasvlakte en onshore DC-hubs bij Maasbracht en in Zeeland, voor export van elektriciteit naar België en Duitsland.
  - Een onshore DC-hub op de Maasvlakte wordt gebruikt voor onder meer extra Multi-Purpose interconnectie met Groot-Brittannië. Dit wordt meegenomen in de doorrekeningen voor systeemintegratie.
  - Een onshore DC-hub in Maasbracht. Met het besluit van de minister in december 2024 om gelijkstroomkabels uit de DRC te halen zijn de onderzoeken naar diepe aanlandingen voor pVAWOZ komen te vervallen. Er is door het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) een nieuw onderzoekstraject gestart voor aanlandingen van wind op zee diep landinwaarts, waarbij ook wordt gekeken naar diepe aanlanding in Limburg.
  - Een onshore DC-hub in Zeeland is niet onderzocht, maar zou extra aanlanding in Zeeland mogelijk maken als (een groot deel van) de elektriciteit direct doorgevoerd wordt naar België. Het lijkt echter onwaarschijnlijk dat dit voor 2040 al gerealiseerd wordt.

## Referenties

- CE Delft. (2024). *Systeemintegratie wind op zee Fase A pVAWOZ 2031-2040*. [https://ce.nl/wp-content/uploads/2024/03/CE\\_Delft\\_220488\\_Startanalyse\\_Systeemintegratie\\_PVAWOZ\\_inclusief\\_bijlagen\\_DEF.pdf](https://ce.nl/wp-content/uploads/2024/03/CE_Delft_220488_Startanalyse_Systeemintegratie_PVAWOZ_inclusief_bijlagen_DEF.pdf)
- ECN, & TNO. (2019). *Cost Evaluation of North Sea Offshore Wind Post 2030*. <https://northseawindpowerhub.eu/files/media/document/Cost-Evaluation-of-North-Sea-Offshore-Wind-1.pdf>
- Netbeheer Nederland. (2023a). *Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's*. <https://www.netbeheernederland.nl/publicatie/rapport-ii3050-scenarios>
- Netbeheer Nederland. (2023b). *Integrale infrastructuurverkenning 2030-2050 eindrapport*. <https://www.tennet.eu/nl/over-tennet/publicaties/integrale-infrastructuurverkenning-2030-2050>
- Netbeheer Nederland. (2024). *ACM publiceert ontwerp codebesluit alternatieve transportrechten*. Netbeheer Nederland. <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/acm-publiceert-ontwerp-codebesluit-alternatieve-transportrechten>
- Netbeheer Nederland. (2025). *Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025*. <https://www.netbeheernederland.nl/publicatie/netbeheer-nederland-scenarios-editie-2025>
- NSWPH. (2024). *Pathway Study 2.0*. <https://northseawindpowerhub.eu/knowledge/pathway-study>
- TenneT. (2022). *Investeringsplan Net op zee 2022-2031*.