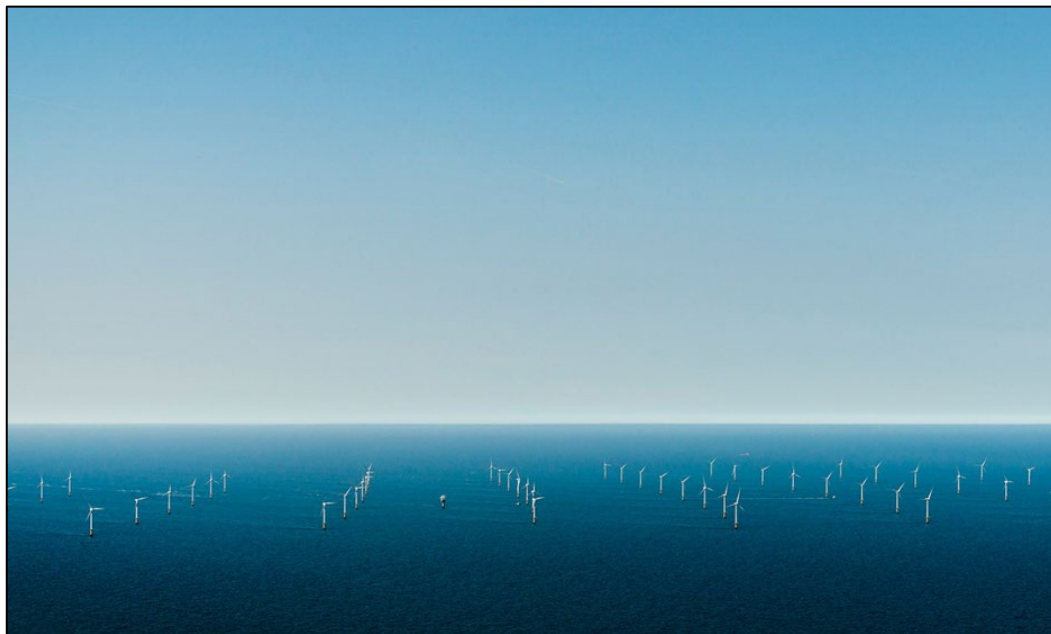




Vermogens, energieopbrengsten en LCoE's van zoekgebied 6/7, Doordewind en lagelander

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW)
Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)

Rapport



Auteurs
Michael Thomson
Imke Maassen van den Brink

Datum
28/01/2025

Project
31201067

E-Mail
michael.thomson@afry.com
imke.maassenvandenbrink@afry.com

Klant
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)

Vermogens, energieopbrengsten en LCoE's van zoekgebied 6/7, Doordewind en lagelander

In deze studie worden de complexe gebiedsindelingen en het trechteringsproces van zoekgebied 6/7, evenals het vermogen, de energieopbrengst en de Levelized Cost of Energy (LCoE) van Doordewind (+ Doordewind-west) en Lagelander onderzocht.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Aanleiding en context.....	4
1.2	Doel van de opdracht	4
1.3	Algemene aanpak	4
2	Vermogen per gebied	7
2.1	Zoekgebied 6/7	7
2.2	Doordewind	8
2.3	Lagelander	13
2.4	Vergelijkingsgebieden IJmuiden Ver Alpha en Beta	13
3	Ruimtelijk proces van Rijk voor zoekgebied 6/7.....	14
3.1	Toelichting ruimtelijke proces zoekgebied 6/7	14
3.2	Uitersten, combinatievarianten, getrechterde varianten.....	16
3.3	Gebiedsindelingen voor energieopbrengstberekeningen.....	22
	Technische uitgangspunten en analyse van energieopbrengsten	23
4	23	
4.1	Aannames windpark.....	23
4.2	Aanpak energieopbrengst berekeningen.....	25
4.3	Energieopbrengst resultaten	29
5	Kostenanalyse (Levelized Cost of Energy)	34
5.1	Aannames voor windpark kosten.....	34
5.2	Aanpak LCoE	36
5.3	Relatieve LCoE resultaten	37
	Conclusies	40
	Aanbevelingen	42
	Bijlage windklimaat.....	43
	Bijlage zogverliezen	46
	Bijlage naburige windparken	52
	Bijlage gebiedsindelingen voor energieopbrengstberekeningen	54
	Bijlage LCoE resultaten ten opzichte van IJmuiden Ver Alpha	57

Terminologie

Term	Uitleg
Capaciteitsfactor	Het percentage van het maximaal haalbare vermogen dat daadwerkelijk wordt geproduceerd over een bepaalde periode.
Combinatievarianten	Varianten waarin de verschillende uitersten voor zoekgebied 6/7 over elkaar heen zijn gelegd en waarin de verschillende ruimtebehoeften op systematische wijze meer en minder zijn gehonoreerd, waardoor zicht ontstaat op de bandbreedte van het aantal GW.
Getrechterde varianten	Overgebleven combinatievarianten na ruimtelijk trechteringsproces voor zoekgebied 6/7, die variëren in omvang van open zone door het midden van het gebied.
Intreedzone	Specifieke zones voor kabels en pijpleidingen waarmee binnen zoekgebied 6/7 rekening is gehouden, hierdoor bestaat flexibiliteit ten aanzien van de toekomstige ligging van kabels en leidingen.
LCoE (Levelized Cost of Energy)	De netto contante waarde van de kosten per geproduceerde eenheid energie over de levensduur van een windpark.
Obstakelvrije zone	Zones rondom infrastructuur zoals platforms, waar geen andere constructies zijn toegestaan.
Vermogen	Het maximale geïnstalleerde vermogen (in GW) dat technisch mogelijk is (bij 5 RD afstand tussen turbines) binnen een opgegeven gebied, rekening houdend met beperkingen zoals ruimte en kabelzones, maar nog niet rekening houden met ruimtelijke, ecologische en financiële afwegingen.
Uiterste	Een ruimtelijke indeling van zoekgebied 6/7 die door het vrijhouden van een specifieke ruimte gunstig is voor een specifiek belang (zoals visserij, natuur, mijnbouw).
Uiterste combinatievarianten	Onderkant en bovenkant van bandbreedte van alle combinatievarianten voor zoekgebied 6/7, qua beschikbare ruimte voor windenergie enerzijds en ruimte die vrij is gehouden van windparken anderzijds.
Uiterste van getrechterde varianten	Onderkant en bovenkant van bandbreedte van alle getrechterde varianten, met ruimte voor minste en meeste aantal GW enerzijds en ruimte voor open zone anderzijds.
Vergelijkingsgebieden	Referentiegebieden zoals IJmuiden Ver Alpha en Beta, gebruikt om prestaties zoals LCoE en energieopbrengst te vergelijken.
Windenergiegebied	Een gebied dat het Rijk formeel heeft aangewezen voor windenergie, alleen binnen deze gebieden mogen kavelbesluiten worden genomen.
Zoekgebied	Een gebied geïdentificeerd voor nader onderzoek naar mogelijke aanwijzing als windenergiegebied. Een zoekgebied heeft geen status en kan van vorm en ligging veranderen.
Zogverliezen	Vermindering van energieopbrengst door invloed van turbulentie en lagere windsnelheid veroorzaakt door windturbines in en nabij een windpark.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context

Om de klimaatdoelstellingen voor 2050 te bereiken, is het noodzakelijk nieuwe windenergiegebieden op zee aan te wijzen binnen het Programma Noordzee. Hiervoor wordt een partiële herziening van het Programma Noordzee 2022-2027 ('PH') voorbereid om ruimte te reserveren voor windparken die na 2031 gerealiseerd zullen worden.

Ten behoeve van voorbereiding van besluitvorming worden zoekgebieden en her te bevestigen windenergiegebieden onderzocht conform de opgestelde Nota Reikwijdte en Detailniveau effecten van toekomstige windparken op milieu en ander gebruik onderzocht in een PlanMER, Figuur 1 toont een kaart waarbij alle te beschouwen gebieden in geel zijn gearceerd.

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft AFRY gevraagd om in deze fase te ondersteunen door een studie uit te voeren naar het vermogen (in GW), de energieopbrengst (in GWh) en de relatieve verschillen in Levelized Cost of Energy ('LCoE' in %) voor verschillende gebieden op zee, te weten zoekgebied 6/7, Doordewind (inclusief Doordewind-west) en Lageland.

1.2 Doel van de opdracht

Het doel van deze studie is om het vermogen van de verschillende zoekgebieden voor de periode 2030-2040 in kaart te brengen. In deze studie wordt het vermogen van verschillende ruimtelijke indelingen van de gebieden onderzocht, waarbij rekening wordt gehouden met andere belangen in en rond het betreffende gebied die een invloed hebben op de beschikbaarheid van het gebied voor windenergie. Hierbij wordt gekeken naar het maximaal vermogen dat in het gebied gerealiseerd kan worden, de energieopbrengst en de relatieve verschillen in LCoE tussen de verschillende gebiedsindelingen. Het doel is inzicht te krijgen in de bandbreedte van het vermogen en de verschillende ruimtelijke afwegingen die te maken zijn.

1.3 Algemene aanpak

Deze studie volgt de onderstaande aanpak:

1. **Definiëren van gebiedsindelingen**

IenW, heeft AFRY gevraagd om gebiedsindelingen inzichtelijk te maken op basis van uitgangspunten en aannames, die tijdens de studie zijn overeengekomen. De begeleidingsgroep heeft de benodigde kaarten verstrekt, waarop de begrenzingen, de aanwezigheid van obstakels, obstakelvrije zones en andere ruimtelijke belangen in het betreffende gebied zijn aangegeven.

2. **Trechteringsproces zoekgebied 6/7**

Het trechteringsproces voor zoekgebied 6/7 is opgezet om systematisch en gefaseerd keuzes te kunnen voorleggen over het aantal GW in dit gebied in totaal en in een eerste fase. Welke gebiedsindelingen hiertoe moesten worden uitgewerkt is bepaald door IenW, in samenwerking met de begeleidingsgroep en waar nodig na interdepartementaal overleg en/of gesprekken met sectoren.

3. **Bepalen vermogen (in GW)**

Voor elke gebiedsindeling berekent AFRY het vermogen door uit te gaan van een vaste aanname voor de dichtheid (10,5MW/km²). Hiernaast wordt rekening gehouden met een reductie van 15% van het beschikbare windgebied

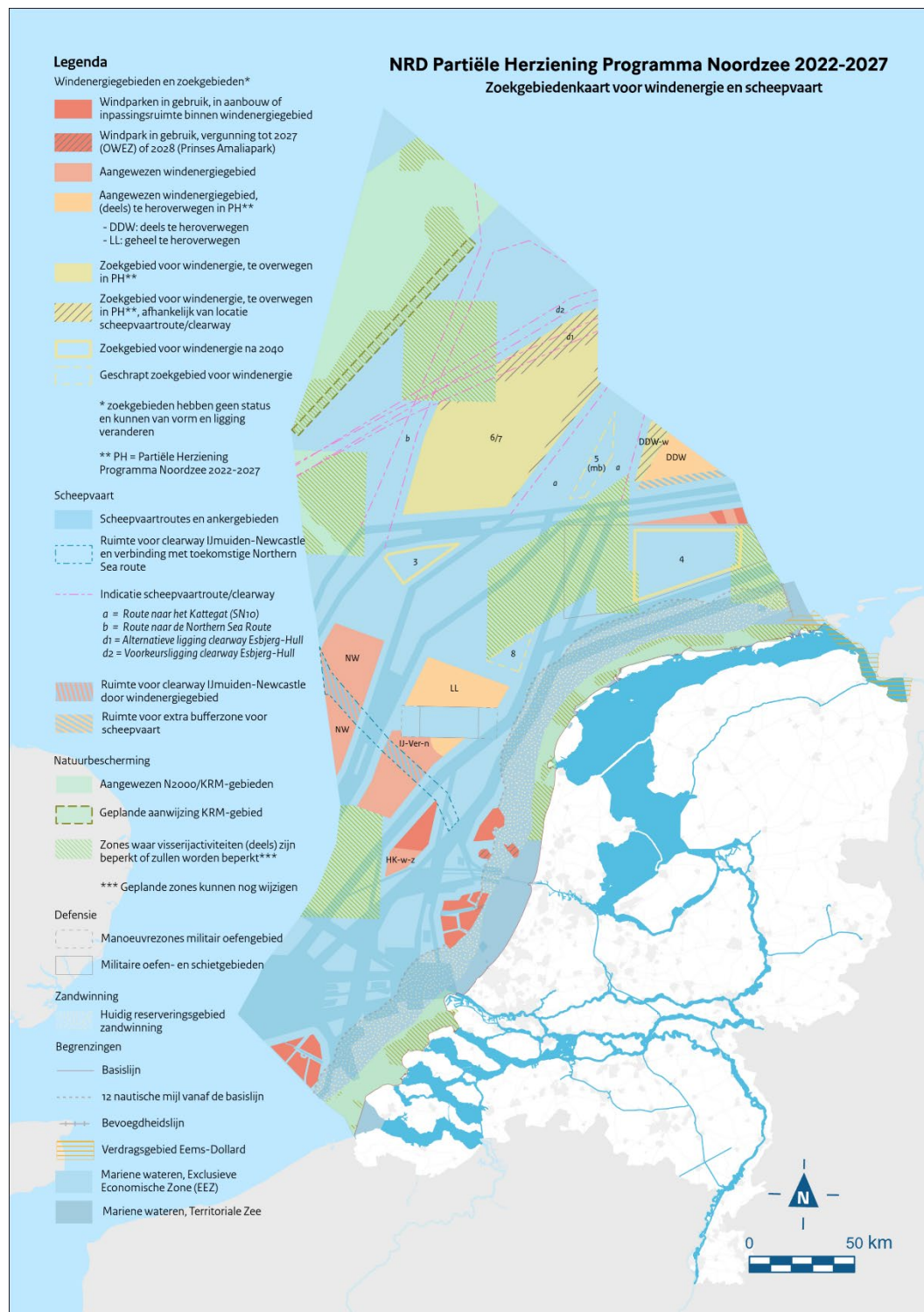
om ruimte vrij te houden voor toekomstige infrastructuur zoals, kabels, leidingen en HVDC- en waterstofplatformen. Aanvullend worden “intreedzones” vrij gehouden van windturbines. Dit zijn zones waar kabels en leidingen vanuit land het gebied in kunnen komen ten behoeve van energie transport van zee naar land.

4. **Inzichtelijk maken van layouts en energieopbrengstberekeningen**

Voor de geselecteerde gebiedsindeling ontwerpt AFRY indicatieve layouts van windparken, gebaseerd op een consistente set van uitgangspunten, zoals het type turbine en de afstand tussen turbines. Deze layouts vormen de basis voor de berekeningen van energieopbrengst en LCoE. De layouts zijn indicatief en niet geoptimaliseerd, en zijn gebaseerd op een regelmatig turbine grid om een eerlijke vergelijking tussen gebiedsindelingen mogelijk te maken. In de praktijk kunnen optimalisaties op basis van gedetailleerdere analyses en locatiegegevens mogelijk zijn, maar deze vallen buiten het kader van deze studie. AFRY simuleert de energieopbrengst met internationaal erkende softwareprogramma's (WASP voor het windklimaat en WindPRO voor de energieopbrengstberekeningen), rekening houdend met het lokale windklimaat en de zogverliezen bij elke layout.

5. **Berekenen van de LCoE**

AFRY maakt voor de LCoE-berekeningen gebruik van een beproefd en eerder ontwikkeld LCoE-model, dat met succes is ingezet voor vergelijkbare studies in 2018 en 2020. Dit model is specifiek ontworpen om nauwkeurige kostenramingen voor offshore windprojecten te leveren en is in de loop der tijd verfijnd op basis van uitgebreide ervaring en praktijkgegevens. Het projectteam verzamelt de meest recente kostengegevens, stemt de belangrijkste aannames af met de begeleidingsgroep en past het model verder aan om de nauwkeurigheid en relevantie voor deze studie te waarborgen. Na het aanpassen van het model berekent AFRY de LCoE voor de verschillende gebieden en gebiedsindelingen en vergelijkt deze met een referentiegebied. Daarnaast analyseert het team van AFRY de invloed van diverse windparkparameters, zoals bruto-energieopbrengst, zogverliezen en fundatiekosten, op de LCoE-verschillen en trekt conclusies op basis van de resultaten. Het doel van de LCoE-modellering is om de relatieve verschillen met andere windparken te vergelijken, niet om absolute LCoE-waarden te bepalen. In dit verslag worden daarom alleen de relatieve verschillen gepresenteerd.



Figuur 1: Zoekgebiedenkaart voor windenergie en scheepvaart (Notitie Reikwijdte en Detailniveau(NRD) Partiële Herziening Programma Noordzee 2022-2027)

2 Vermogen per gebied

In dit hoofdstuk worden de gebieden zoekgebied 6/7, Doordewind (inclusief Doordewind-west) en Lageland besproken die in deze studie zijn geanalyseerd. Elk gebied heeft unieke kenmerken en mogelijke ruimtelijke beperkingen (afwegingen volgen later) die een belangrijke rol spelen bij het vaststellen van de indicatieve layout. Deze factoren beïnvloeden het fysiek haalbare vermogen, de energieopbrengst en de verschillen in LCoE. Voor elk van de gebieden worden de relevante gebiedskenmerken beschreven, zoals de oppervlakte, waterdiepte en het windklimaat, evenals andere ruimtebeperkingen zoals bestaande kabels, leidingen en platformen. Het doel is inzicht te krijgen in het beschikbare vermogen (in GW) in de periode 2030-2040.

2.1 Zoekgebied 6/7

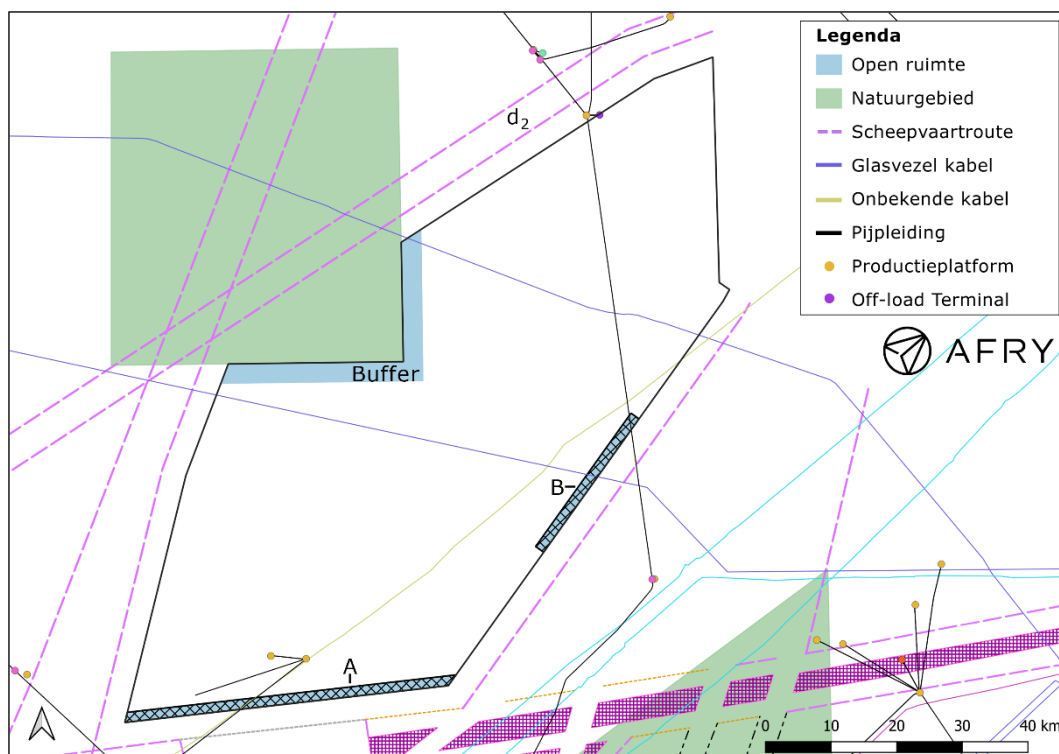
Zoekgebied 6/7 is het grootste zoekgebied dat is geïdentificeerd voor windenergie op zee en kan daarom bij aanwijzing een sleutelrol spelen in het realiseren van de nationale ambities voor duurzame energieopbrengst. Het Nederlandse kabinet heeft plannen aangekondigd om de capaciteit van windenergie op zee fors uit te breiden, met als 50 gigawatt vermogen als ambitie voor 2040. Tegelijkertijd zijn er binnen het gebied ook andere belangen, zoals natuurbehoud, visserij en mijnbouw die ruimtelijke beperkingen met zich meebrengen. Om de ambitie voor windenergie zo goed mogelijk te verenigen met deze belangen, is specifiek onderzocht hoe gebiedsindelingen kunnen worden vorm gegeven om de invloed op sectoren zoals natuurbehoud, visserij en mijnbouw tot een minimum te beperken. Hiervoor is een proces van stapsgewijs convergeren naar meerdere mogelijke gebiedsindelingen, oftewel opties, voor zoekgebied 6/7 gevolgd, wat in hoofdstuk 3 wordt beschreven als het 'trechteringsproces'. Deze paragraaf richt zich op de relevante gebiedskenmerken en ruimtelijke beperkingen van heel zoekgebied 6/7.

Het zoekgebied 6/7 heeft een gunstig windklimaat met een gemiddelde windsnelheid van 10,4 m/s, een gemiddelde waterdiepte van 45 meter en een oppervlakte van 4637 km².

Daarnaast wordt rekening gehouden met de volgende ruimtelijke beperkingen:

- **Scheepvaartroute d₂**
De verwachting is dat het noorden van zoekgebied 6/7 begrensd wordt door een scheepvaartroute in de vorm van een clearway met aanduiding d₂ in de NRD-kaart.
- **Een bufferzone van 3 km rond de centrale oestergronden**
Een bufferzone van 3 km rond de centrale oestergronden in het noordwesten is ingesteld om de ecologische invloed (externe werking in het geval van aanwijzing als Vogelrichtlijngebied) van windenergie te verminderen.
- **Intreedzones van 1500 meter in het zuiden (A) en zuidoosten (B)**
Intreedzones A en B zijn gereserveerd als doorgangen voor toekomstige pijpleidingen en kabels. Ze zijn volledig vrijgehouden, omdat de exacte ligging van de kabel- of leidingtracés nog niet bekend is en er meerdere kabels en/of leidingen verwacht worden. De intreedzones worden niet weergegeven in de figuren, maar zijn wel vrijgehouden van windparken in de GW-berekeningen.

Deze ruimtelijke beperkingen, samen met de bestaande infrastructuur, zijn weergegeven in Figuur 2.

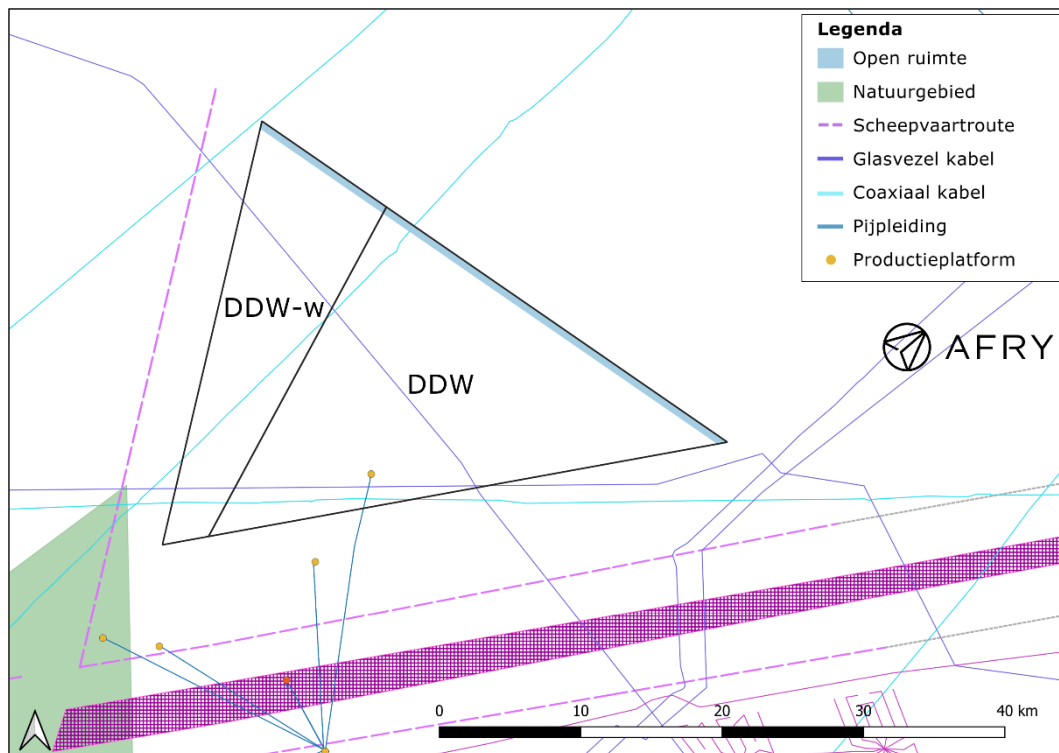


Figuur 2: Zoekgebied 6/7 met ruimtelijke beperkingen en bestaande infrastructuur

2.2 Doordewind

Deze paragraaf bespreekt de gebiedskenmerken, ruimtelijke beperkingen en drie mogelijke gebiedsindelingen voor windenergieontwikkeling binnen het windenergiegebied Doordewind en het zoekgebied Doordewind (west). Doordewind is een reeds aangewezen windenergiegebied waarin, onder de Aanvullende Routekaart 2030 ('ARK'), een 2GW-kavel gepland staat. In het kader van de PH wordt onderzocht of de capaciteit van dit gebied kan worden uitgebreid. Hiervoor moet het bestaande gebied worden herbevestigd en mogelijk worden uitgebreid met zoekgebied Doordewind (west).

In vergelijking met de NRD-kaart (Figuur 1) wordt de zuidelijke strook van Doordewind niet benut voor windparken, op verzoek van het begeleidingsteam. Deze keuze is gemaakt vanwege scheepvaart risico's op deze locatie en de noodzaak om een grotere afstand aan te houden tussen de aangrenzende scheepvaartroute en toekomstige windparken. Daarnaast is het zoekgebied Doordewind (west) toegevoegd om een betere aansluiting te kunnen realiseren met Duitse windparken.

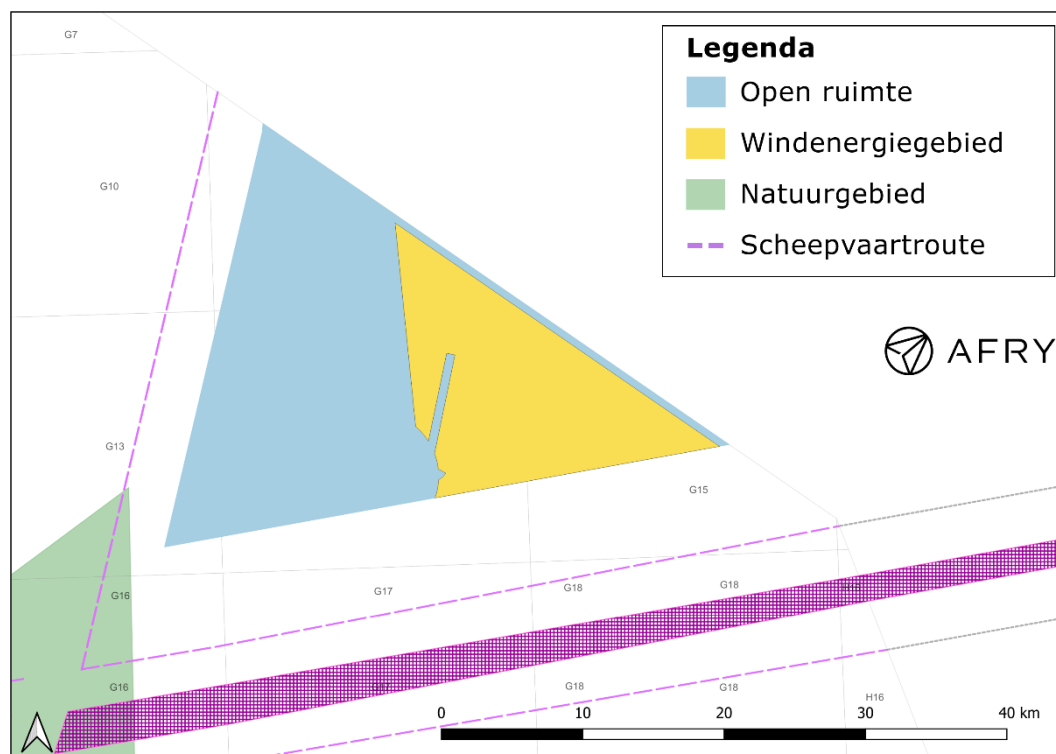


Figuur 3: Doordewind en Doordewind-west met ruimtelijke beperkingen en bestaande infrastructuur

Het gebied, weergegeven in Figuur 3, heeft een gunstig windklimaat met een gemiddelde windsnelheid van 10,5 m/s, een gemiddelde waterdiepte van 39 meter en een oppervlakte van 573 km², waarvan 385 km² voor het reeds aangewezen windenergiegebied Doordewind en 188 km² voor het zoekgebied Doordewind (west).

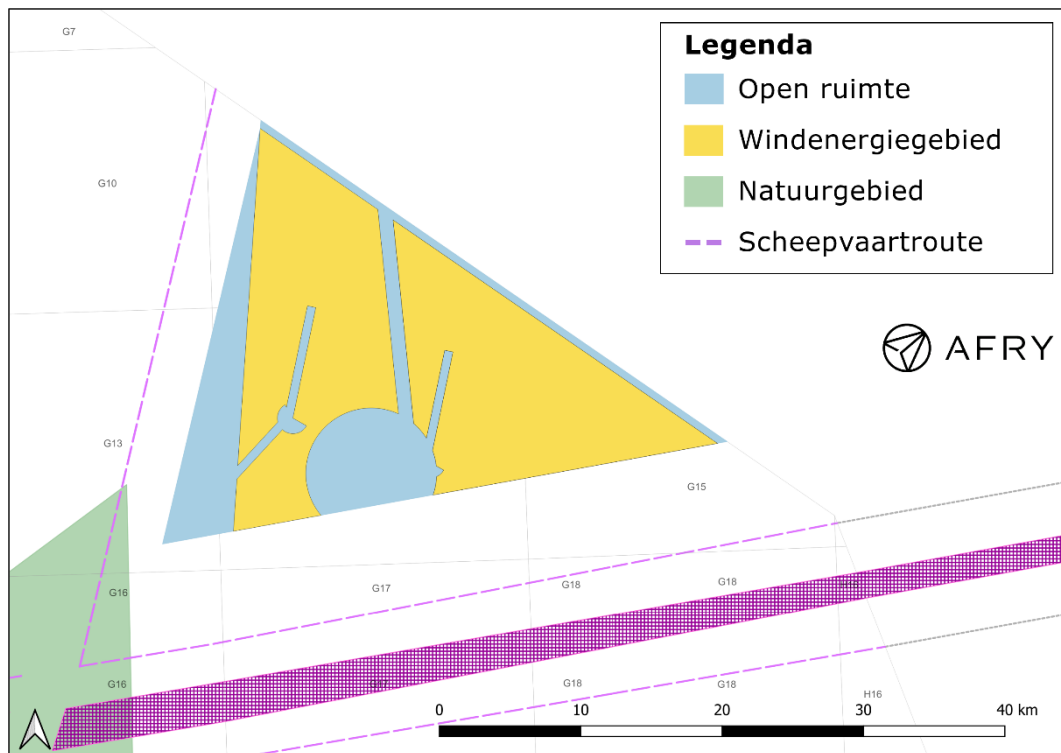
Voor de PH zijn drie mogelijke gebiedsindelingen onderzocht. Deze varianten houden rekening met verschillende obstakelvrije zones rondom mijnbouwplatform G14-A (geen of 2,5NM), en variëren in vermogen (2GW, 4GW en 6GW). De gebiedsindelingen verschillen in grootte en vorm en zijn afgestemd op ruimtelijke beperkingen, zoals de omliggende infrastructuur, scheepvaartroutes, natuurgebieden, en de obstakelvrije zones rondom TenneT's 2GW HVDC-substation en kabelgoten. Daarnaast is een open ruimte van 500 meter vanaf de Duitse grens gehanteerd. Bij twee van de drie varianten is het zoekgebied Doordewind (west) gebruikt, terwijl de referentie variant zich beperkt tot het reeds aangewezen windenergiegebied.

Figuur 4 geeft de referentie variant weer met 2GW vermogen, dit is de variant voor het windpark onder de huidige routekaart. Voor deze variant is alleen een obstakelvrije zone van 2,5NM rond het mijnbouwplatform meegenomen, zonder uitbreiding naar het zoekgebied Doordewind-west. Deze variant blijft binnen de grenzen van de Aanvullende Routekaart 2030 (ARK) en is meer compact van opzet, met een focus op efficiëntie binnen het reeds aangewezen windenergiegebied.



Figuur 4: (Referentie) Ruimtelijke intekening van het windgebied Doordewind

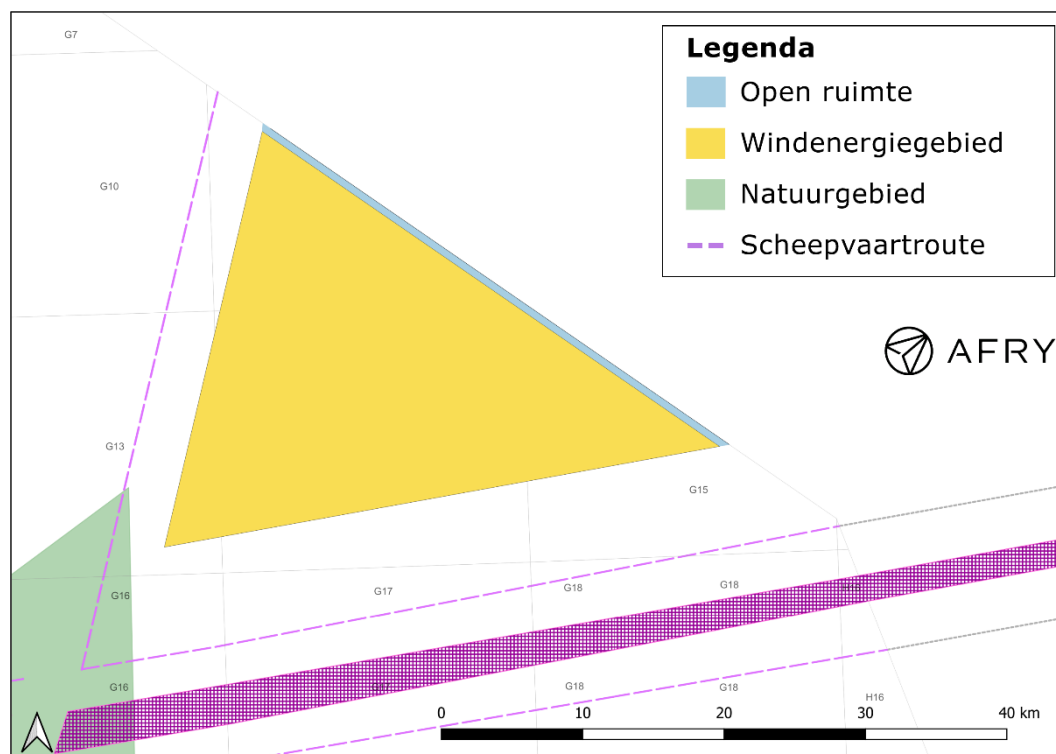
Figuur 5 is een weergave van de variant van Doordewind met 4GW én helikopterruimte voor het mijnbouwplatform, aangeduid als variant '+2GW'. In deze variant zijn zowel het zoekgebied Doordewind-west als een obstakelvrije zone met een straal van 2,5NM rond mijnbouwplatform G14-A opgenomen. Deze configuratie biedt de mogelijkheid om het vermogen van het gebied te maximaliseren binnen de gestelde beperkingen. Alleen zonder de betreffende helikopterruimte is in dit gebied bij de aangenomen turbinedichtheid meer GW mogelijk.



Figuur 5: (+2GW) Ruimtelijke intekening van het windgebied Doordewind en zoekgebied Doordewind-west +2GW

Figuur 6 is een weergave van de +4GW-variant van Doordewind met 6GW in totaal én zonder helikopterruimte voor het mijnbouwplatform. In deze variant is heel

Doordewind-west als windenergiegebied opgenomen en de dichtheid verhoogt (10,9MW/km²) om 6GW erin te kunnen plaatsen.



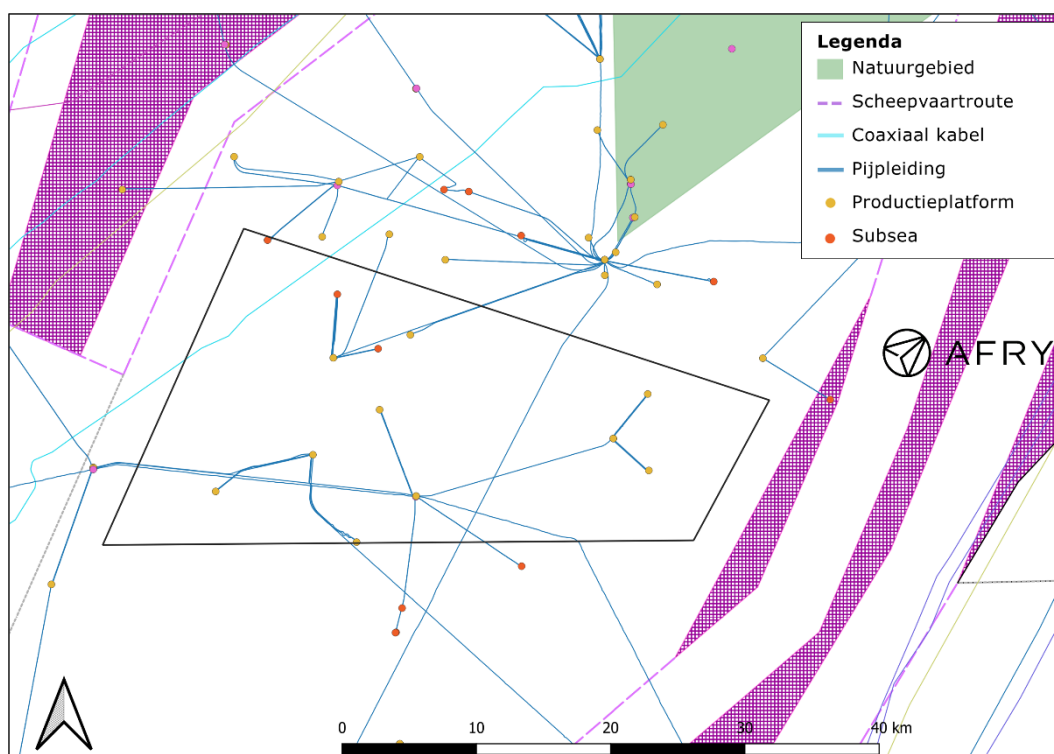
Figuur 6: (+4GW) Ruimtelijke intekening van het windgebied Doordewind en zoekgebied Doordewind-west

2.3 Lageland

In deze paragraaf worden de gebiedskenmerken en ruimtelijke beperkingen voor windenergieontwikkeling van zoekgebied Lageland besproken.

Het gebied heeft een gunstig windklimaat met een gemiddelde windsnelheid van 10,2 m/s, een gemiddelde waterdiepte van 27 meter en een oppervlakte van 758 km².

Figuur 7 laat Lageland zien met de bestaande infrastructuur. Deze obstakels zoals, mijnbouwplatformen of andere ruimtelijke belangen, zullen van invloed zijn op de uiteindelijke indeling van het gebied.

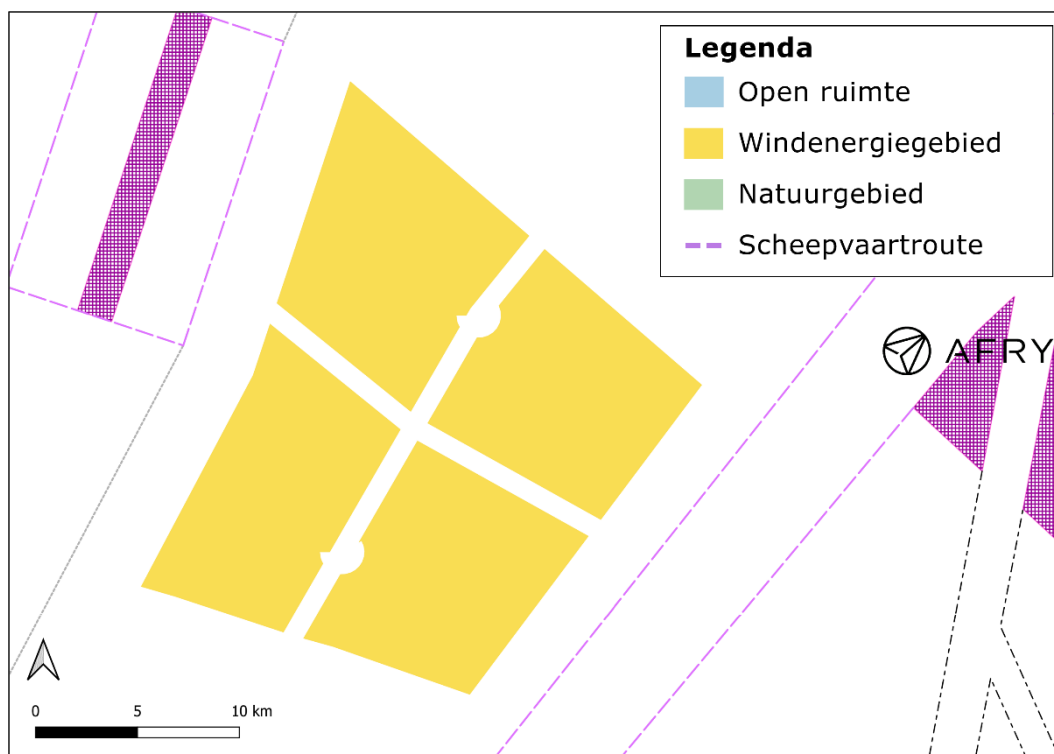


Figuur 7: Lageland met bestaande infrastructuur

Aangezien de ruimtelijke beperkingen voor Lageland nog niet volledig in kaart zijn gebracht, is een ruwe aanname gemaakt over de beschikbare ruimte. Om een analyse te kunnen doen wordt een rechthoek van 200 km² in het oostelijke deel van het windgebied gebruikt als aanname.

2.4 Vergelijkingsgebieden IJmuiden Ver Alpha en Beta

Voor een relatieve vergelijking van de LCoE is een vergelijkingsgebied noodzakelijk. Aangezien IJmuiden Ver Alpha en Beta met succes zijn gegund door de Nederlandse overheid, worden deze gebieden als economisch rendabel beschouwd. Wanneer we de LCoE van andere gebieden vergelijken met deze vergelijkingsgebieden, mag redelijkerwijs worden verwacht dat deze ook economisch levensvatbaar zullen zijn.



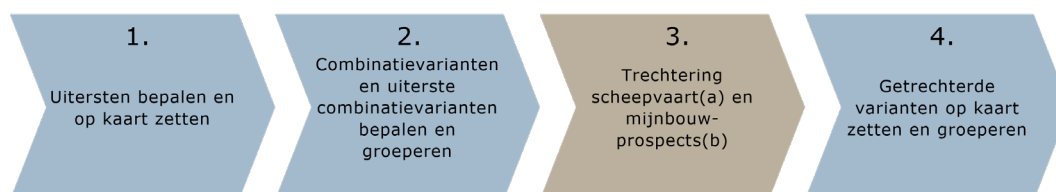
Figuur 8: Vergelijkingsgebieden IJmuiden Ver Alpha (twee zuidelijke kavels) en Beta

3 Ruimtelijk proces van Rijk voor zoekgebied 6/7

In dit hoofdstuk wordt het proces beschreven waarin door middel van opeenvolgende stappen is geconvergeerd door het Rijk naar opties voor zoekgebied 6/7. Het doel van dit proces is om ruimtelijke keuzes inzichtelijk te maken en uiteindelijk te trechteren.

3.1 Toelichting ruimtelijk proces zoekgebied 6/7

In deze paragraaf wordt toegelicht hoe het ruimtelijk proces voor zoekgebied 6/7 is verlopen. Dit proces bestaat uit opeenvolgende stappen waarmee de beschikbare ruimte systematisch is geanalyseerd en ingedeeld.



Figuur 9: Flowdiagram met de stappen van het ruimtelijk proces voor zoekgebied 6/7

Figuur 9 toont de opeenvolgende stappen in het ruimtelijk proces, van het vaststellen van uitersten tot het trechteren en groeperen van opties voor zoekgebied 6/7. Het proces bestaat uit vier stappen:

- 1. Uitersten bepalen en op kaart zetten:** Allereerst zijn de "uitersten" visserij, natuur en mijnbouw (olie- en gaswinning) bepaald, waarbij vanuit verschillende perspectieven een gunstige ruimtelijke indeling is gehanteerd. Voor het uiterste voor windenergie is uitgegaan van maximale benutting van het gebied.

- 2. Combinatievarianten en uiterste combinatievarianten bepalen en clusteren:** Vervolgens zijn "combinatievarianten" ontwikkeld door de uitersten te combineren, om zo een overzicht te creëren van mogelijke indelingen (33 combinatievarianten) en daarbij de twee uiterste combinatievarianten bepalen, met de minste en meeste ruimte voor windenergie.
- 3. Trechtering scheepvaart(a) en mijnbouw-prospects(b):** Na onderzoek naar scheepvaartveiligheid, waaruit bleek dat een open zone acceptabel was vanuit dat perspectief onder voorwaarde van een minimale vrij te houden ruimte, zijn een deel van de combinatievarianten afgefallen. Ook zijn een aantal prospects voor mijnbouw minder kansrijk geacht, waardoor op de betreffende locaties geen noodzaak meer is om eventueel ruimte vrij te houden voor helikopterbereikbaarheid.
- 4. Getrechterde varianten op kaart zetten en groeperen:** Op basis van het trechteringsproces is tot acht getrechterde varianten gekomen. Deze zijn gegroepeerd in drie verschillende groepen, de "opties voor 6/7," gebaseerd op het vermogen en de omvang van de open zone.

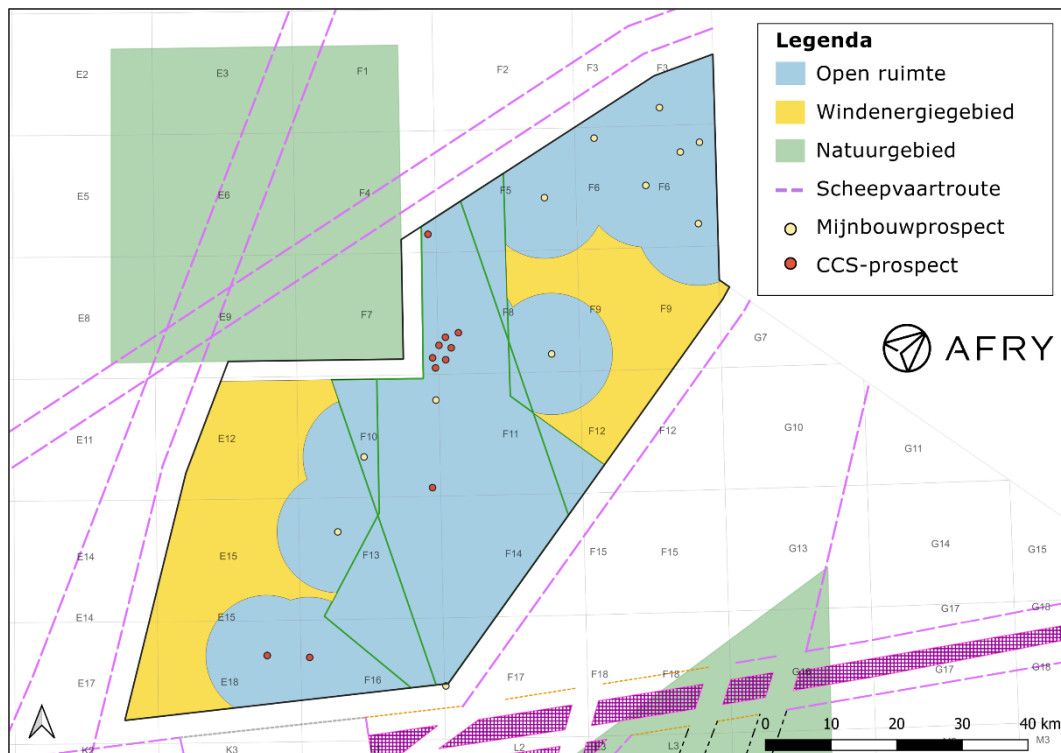
De verschillende stappen in dit proces zorgen ervoor dat de bandbreedte inzichtelijk wordt voor politieke keuzes, ook zijn onzekerheden t.a.v. de benodigde ruimte voor helikopterbereikbaarheid inzichtelijk gemaakt.

Figuur 10 toont de legenda van de kaarten voor zoekgebied 6/7, waarin de ruimtelijke kenmerken en mogelijk vrij te houden ruimte voor andere functies wordt weergegeven, waaronder mogelijke ruimte voor obstakelvrije zones die zijn bedoeld voor de helikopterbereikbaarheid rondom kansrijke locaties voor olie- en gasplatforms en voor CCS en waterstofopslag. Deze zones hebben straalafstanden van respectievelijk 5 NM, 2,5 NM en 500 meter.

Legenda	
	Natuurgebied
	Scheepvaartroute
	Open ruimte
	Windenergiegebied
	Onzekerheidsmarge windenergiegebied
	Obstakelvrije zone ten behoeve van helikopterbereikbaarheid rondom (mogelijk toekomstige) olie- en gasplatforms met een straal van respectievelijk 5, 2,5NM en 500 meter
	Obstakelvrije zone ten behoeve van helikopterbereikbaarheid rondom kansrijke locaties voor CCS en waterstofopslag met een straal van respectievelijk 5, 2,5NM en 500 meter

Figuur 10: Legenda van de kaarten voor zoekgebied 6/7

De obstakelvrije zones in dit gebied zijn open zee, vrij van windparken en andere constructies. Alleen voor de obstakelvrije zones met straal van 500 meter geldt dat hierbinnen geen schepen zijn toegestaan, uiteraard geldt dat alleen bij realisatie van een platform op de betreffende locatie. Dit wordt duidelijk weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11: Weergave van obstakelvrije zones als open zee in de uiterste combinatievariant met minimale ruimte voor windenergie

3.2 Uitersten, combinatievarianten, getrechterde varianten

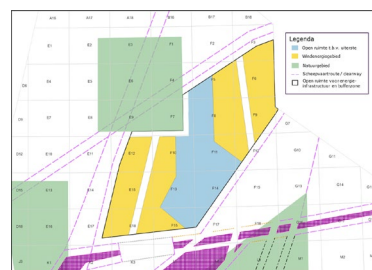
Deze paragraaf beschrijft de methodiek achter de ruimtelijke indeling van zoekgebied 6/7. Hierbij wordt uitgelegd hoe de uitersten zijn vastgesteld, hoe combinatievarianten zijn ontwikkeld door verschillende ruimtelijke belangen te combineren, en hoe getrechterde varianten zijn bepaald om tot haalbare opties te komen.

Stap 1: Uitersten bepalen en op kaart zetten

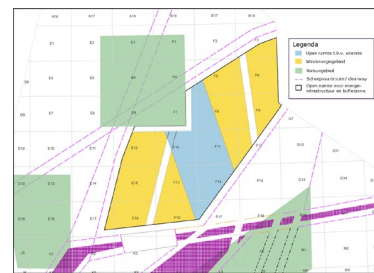
In Tabel 1 zijn in kaart en tekst de "uitersten" aangegeven

Tabel 1: Overzicht van de "uitersten" met bijbehorende toelichtingen.

In het uiterste voor **visserij** is in overleg met de sector en op basis van visserij-intensiteitskaarten ruimte vrijgehouden voor bordenvisserij op Noorse Kreeft, omdat dit type visserij zeer specifiek is voor de betreffende locatie.



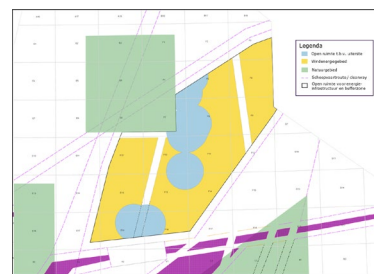
In het uiterste voor **natuur** wordt in het midden van zoekgebied 6/ een zone vrijgehouden om barrièrewerking en habitatverlies voor zeevogels te voorkomen. Het vrijhouden van ruimte in het midden draagt bovendien bij aan het voorkomen van negatieve ecosysteemeffecten vanwege het verhoogd slibgehalte (dit geldt ook voor visserij- uiterste)



De uitersten voor **olie- en gaswinning** gaan uit van obstakelvrije zones met een straal van 5NM voor de helikopterbereikbaarheid van (mogelijke toekomstige) platforms voor olie- en gaswinning (afbeelding boven). Hetzelfde geldt voor kansrijke locaties voor CCS (**koolstofafvang en -opslag**) en **waterstofopslag** (afbeelding onder). In beide afbeeldingen gaat het nadrukkelijk om potentiële mogelijkheden en kansen, in de praktijk zullen niet alle locaties tot ontwikkeling komen.

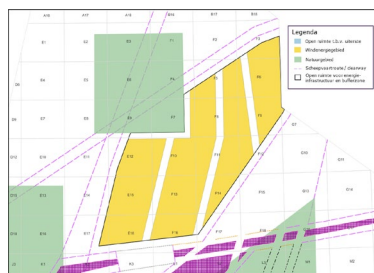


In het midden van zoekgebied 6/7 zijn acht kansrijke locaties aangegeven voor waterstofopslag. Indien waterstofopslag daadwerkelijk wordt gerealiseerd, zijn op basis van de huidige verwachtingen niet meer dan vier platforms nodig.



Voor alle weergegeven locaties, ook voor CCS en olie- en gaswinning, geldt dat het geïdentificeerde kansen zijn en dat het waarschijnlijk dat een aantal locaties zal afvallen. Overigens kunnen zich ook nog nieuwe kansen voordoen. Het opnemen van de geïdentificeerde locaties in de uitersten biedt de mogelijkheid om in de toekomst ruimte vrij te houden, mocht de ontwikkeling doorgaan. De besluitvorming over deze activiteiten valt echter buiten de scope van de huidige Partiele Herziening (PH).

Bovenstaande uitersten worden vergeleken met een meer theoretische gebiedsindeling waarbij het hele gebied wordt benut voor **windenergie**.

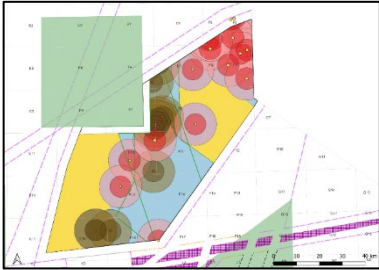
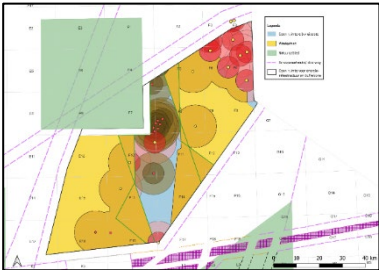


Stap 2: Combinatievarianten en uiterste combinatievarianten bepalen en clusteren:

De uitersten zijn over elkaar gelegd om te bepalen hoeveel windgebied beschikbaar blijft, en daarmee hoeveel vermogen (in GW) haalbaar is, wanneer de volledige open zone wordt vrijgehouden van windparken. Uit deze analyse blijkt dat de ambitie voor windenergie op zee in dat geval niet gerealiseerd kan worden. Daarom zijn systematisch combinatievarianten ontwikkeld, waarbij ofwel meer open zone wordt gereserveerd voor natuur, visserij en scheepvaart, ofwel voor helikopterbereikbaarheid.

Alle combinatievarianten bevinden zich tussen twee uiterste combinatievarianten: - één waarbij de vrijgehouden ruimte in alle uitersten uit stap 1) gecombineerd wordt en vrijgehouden van windparken en één waarbij slechts een zeer beperkt deel van deze ruimte wordt vrijgehouden van windparken. Tussen de twee uiterste combinatievarianten zijn tal van gebiedsindelingen denkbaar. Deze zijn beschreven in de bijlage 'Combinatievarianten 0 t/m 33'. In Tabel 2 worden de twee uiterste combinatievarianten weergegeven en beschreven.

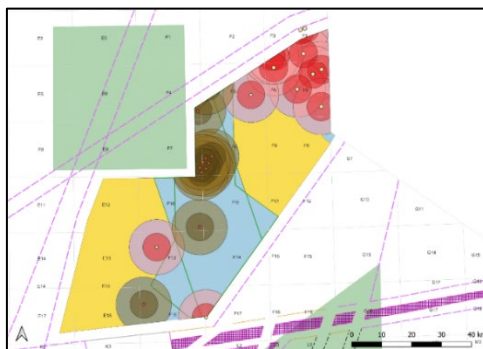
Tabel 2: Kaartbeelden en beschrijving van de twee uiterste combinatievarianten

Uiterste combinatievariant waarin de ruimtebehoefte uit alle sectorale uitersten gecombineerd wordt vrijgehouden, wat resulteert in het minimale aantal GW voor windenergie (10,8 GW). Dit cijfer is exclusief eventuele ruimte voor monitoring van CCS en houdt geen rekening met toekomstige minimale kavelgroottes. 	Uiterste combinatievariant met de meeste ruimte voor windenergie. In deze variant wordt een minimale open ruimte vrijgehouden voor andere belangen dan windenergie. In het noordoosten blijft ruimte beschikbaar voor de mijnbouwprospecten in dit gebied, die in vergelijking met andere mijnbouw prospects al in een verder stadium van planvorming verkeren. Daarnaast wordt een corridor van minimale breedte door het midden van het gebied vrijgehouden. In okergeel is aangegeven welke ruimte uit de uitersten hier juist niet is vrijgehouden van windparken. 
---	--

Stap 3: Trechtering scheepvaart(a) en mijnbouw-prospects(b)

Geen rekening houden met niet-kansrijke prospects.

Parallel aan het proces is duidelijk geworden dat een aantal prospects voor mijnbouw niet meer kansrijk worden geacht. Deze zijn afgefallen, in de zin dat hier geen ruimte meer voor hoeft te worden vrijgehouden. Dat maakt dat de uiterste combinatievariant zoals linksboven bij stap 2 is afgebeeld, gaande het proces als volgt is aangepast:



Figuur 12: Uiterste combinatievariant met minimale aantal GW en afgefallen prospects

Onzekerheidsmarges ten aanzien van mijnbouw

In de verschillende combinatievarianten is met verschillende obstakelvrije zones voor mogelijk toekomstige mijnbouwplatforms rekening gehouden. In 2023 besloot het Rijk¹ windenergie en mijnbouw zoveel mogelijk beide te faciliteren, door middel van maatwerkoplossingen in ruimte en tijd. Daartoe lijkt bijvoorbeeld de Point-in-Space (PinS)-vliegprocedure kansrijk, of shuttelen. Dit kan leiden tot een reductie van de benodigde ruimte rondom mijnbouwactiviteiten, tot aan een minimale obstakelvrije zone van ongeveer 2,5 NM. De verwachting is dat er in 2025 meer duidelijkheid komt over de haalbaarheid van deze procedure. Ook over de noodzaak om ruimte te reserveren voor een CCS-prospect in het zuidwesten van zoekgebied 6/7 (namelijk blok F16) komt later in het proces beslisinformatie beschikbaar. Om die reden is er in de getrechterde varianten rekening gehouden met een onzekerheidsmarge voor mijnbouw, weergegeven in de figuren in okergeel.

Rekening houden met minimaal benodigde ruimte voor scheepvaart

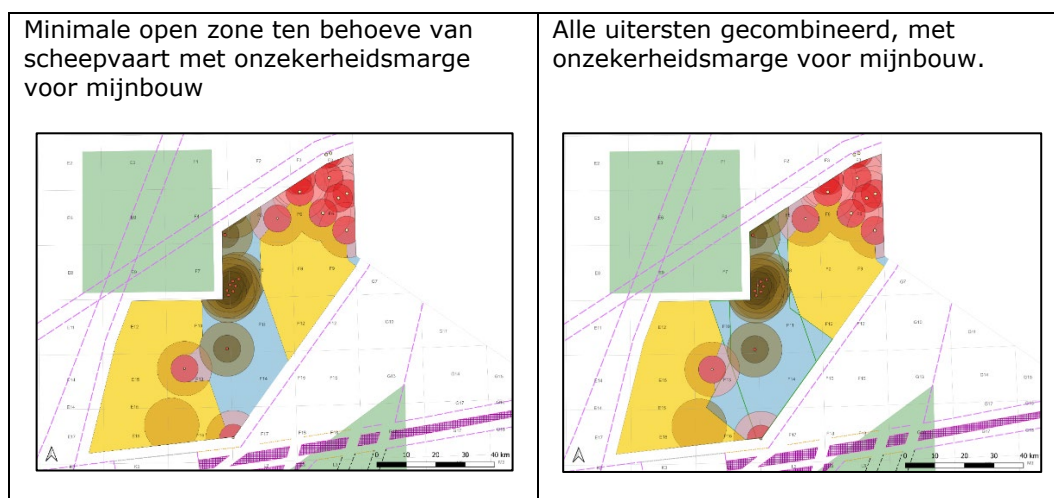
Door het over elkaar leggen van de uitersten wordt duidelijk dat in het midden meerdere ruimtelijke belangen samenkomen, waaronder visserij, natuur en mijnbouw. Om hier rekening mee te houden, is in alle combinatievarianten een open ruimte in het midden behouden. Volgens internationale regelgeving kan scheepvaart niet worden geweerd uit delen van de open zee. Tegelijkertijd brengt doorvaart tussen windparken aan beide zijden veiligheidsrisico's met zich mee. Daarom is onderzoek gedaan naar scheepvaartveiligheid. Uit de analyse blijkt dat een open zone geen problemen oplevert voor de veiligheid, mits deze een minimale omvang heeft. Alle combinatievarianten waarin de open zone kleiner is dan deze minimale open zone, zijn afgefallen, omdat zij niet voldoen aan de randvoorwaarden voor scheepvaartveiligheid. Het bijbehorende kaartbeeld is te vinden in Tabel 3 bij stap 4.

¹ Intern gebruik
Kamerbrieven over ruimtelijke samenhang windparken en mijnbouwactiviteiten op zee
<https://open.overheid.nl/documenten/ronl-d28de3064f3fe61d1e9dca0471dfc95b59b5d416/pdf>

Stap 4: Getrechterde varianten op kaart zetten en groeperen

Op basis van de minimale ruimte voor scheepvaart is een minimale open zone bepaald. De maximale open zone wordt gevormd door de uitersten van natuur en visserij over elkaar te leggen. Vervolgens zijn “de uiterste getrechterde varianten” bepaald door bij toepassing van respectievelijk de minimale en de maximale open zone ook rekening te houden met de mogelijk benodigde ruimte voor mijnbouw zoals hierboven is beschreven. Daarmee ontstaan de kaartbeelden in Tabel 3. Deze vormen samen de bandbreedte voor de getrechterde varianten, en zijn dus de uitersten van de getrechterde varianten.

Tabel 3: Weergave en beschrijving van de twee uiterste getrechterde varianten

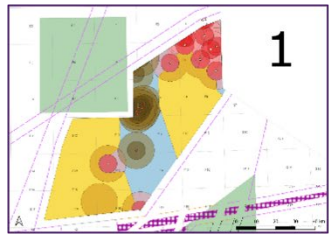
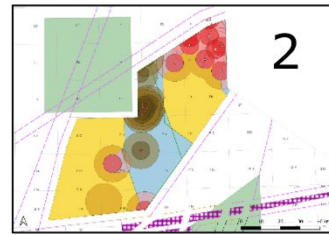
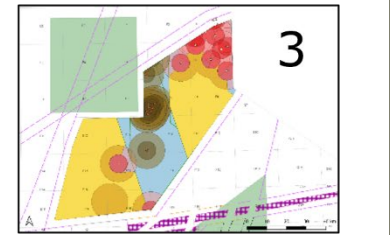
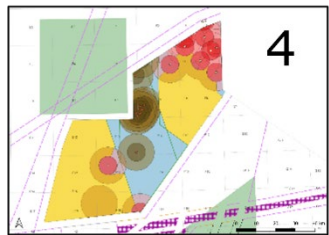
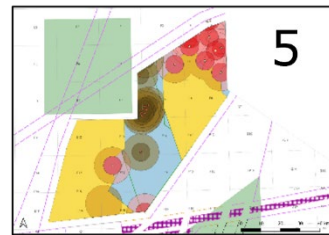
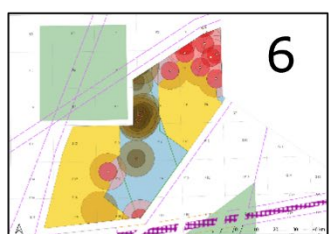
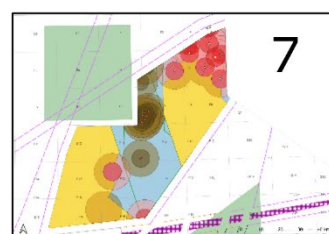
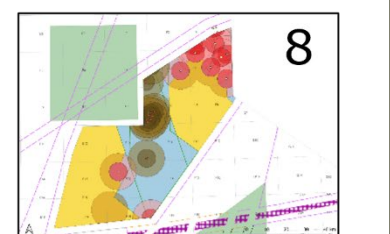


In de partiële herziening wordt geen besluit genomen over de exacte locatie van de open zone, maar wel over (een bandbreedte voor) de omvang van de open zone, evenals aandachtspunten en eventuele voorwaarden mee te geven voor de verdere uitwerking van ligging en breedte. Om keuzemogelijkheden inzichtelijk te maken tussen deze twee uitersten van getrechterde varianten ook andere getrechterde varianten in beeld gebracht, en gegroepeerd in drie opties.

In de besluitvorming door het Rijk is het aantal haalbare GW naar beneden afgerond op basis van een aanname over de minimale kavelgrootte (0,5 GW voor waterstofelektrolyse, naast de standaard 2 GW-kavels voor elektriciteitsproductie). Hierdoor ontstonden groepen van circa 19, 20 en 21 GW. In de berekeningen van AFRY zijn deze afrondingen niet toegepast.

In de onderstaande tabel worden de drie opties weergegeven en welke getrechterde varianten daarin vallen. Dit betekent niet dat de uiteindelijke gebiedsindeling voor de uitrol van windenergie op zee exact overeenkomt met een van de weergegeven getrechterde varianten. De precieze locaties van de windparken en de open zone zullen stapsgewijs worden uitgewerkt in een gebiedsuitwerking en in de kavelbesluiten.

Tabel 4: Overzicht van de gegroepeerde opties voor 6/7

Opties voor 6/7	Figuren van de combinatievarianten voor opties voor 6/7		
<u>Basis open zone (minimale open zone)</u> Windenergie: circa 21 GW² Omvang open zone: 1319-1419 km²	 1	 2	 3
<u>Bredere open zone</u> Windenergie: circa 20 GW Omvang open zone: 1420-1519 km²	 4	 5	
<u>Meest brede open zone (maximale open zone)</u> Windenergie: circa 19 GW³ Omvang open zone: 1520-1619 km²	 6	 7	 8

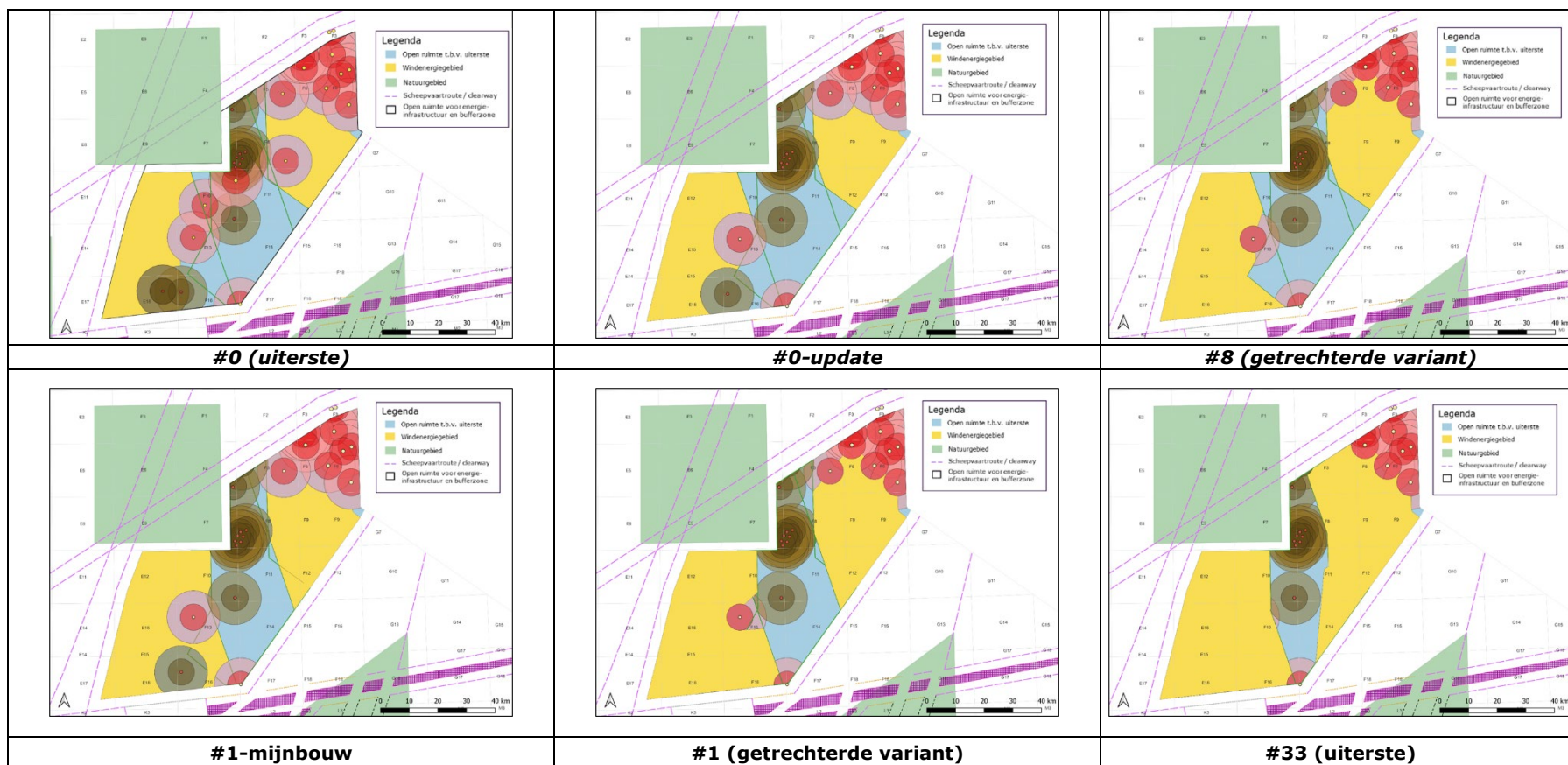
Meest links: kleinste open zone na trechtering

Meest rechts: maximale open zone na trechtering

² Bij de basis open zone kennen de "getrechterde varianten" een bandbreedte: 20,5-21,5 GW (circa 21).
³ Bij de meest brede open zone is dat ook het geval: 18,5-19,5 GW (circa 19).

3.3 Gebiedsindelingen voor energieopbrengstberekeningen

In deze paragraaf worden de gebiedsindelingen besproken die zijn gebruikt voor energieopbrengstberekeningen.



4 Technische uitgangspunten en analyse van energieopbrengsten

In dit hoofdstuk worden de technische aannames uiteengezet die de basis vormen voor de energieopbrengstberekeningen en worden de energieopbrengsten geanalyseerd. Allereerst worden de aannames voor het windpark toegelicht, zoals de keuze van het type turbine. Vervolgens worden de uitgangspunten voor de berekening van de energieopbrengst beschreven. Tot slot worden de resultaten van de energieopbrengstberekeningen geanalyseerd voor de verschillende gebiedsindelingen.

4.1 Aannames windpark

Voor deze studie is uitgegaan van specifieke aannames voor het windpark, met als belangrijkste de keuze voor een 20MW turbine. Deze keuze, gemaakt in overleg met de opdrachtgever na consultatie van markt en wetenschap, weerspiegelt de verwachting dat turbines met een vergelijkbare capaciteit in de toekomst in de betreffende gebieden zullen worden geplaatst.

Deze verwachting is gebaseerd op de voortgang van Europese OEM's (Original Equipment Manufacturers) in de ontwikkeling van grotere turbines. Terwijl sommige OEM's geen hogere capaciteitsturbines ontwikkelen⁴, verwacht Siemens Gamesa een 21MW turbine te introduceren in 2025. Echter, de wereldwijde concurrentie op het gebied van turbinecapaciteit neemt toe. Chinese OEMs, gesubsidieerd door de Chinese overheid, zullen naar verwachting de komende jaren vooroplopen met turbines in de range van 18⁵-26^{6,7}MW. AFRY acht het zeer waarschijnlijk dat deze Chinese turbines dit decennium de Europese markt zullen betreden, met de eerste Chinese turbines al gepland voor Duitse projecten in 2029 en 2030, maar de vraag is of dit ook geldt voor de Nederlandse markt. Ondanks deze ontwikkelingen blijft het namelijk onzeker of zorgen over cyberbeveiliging met betrekking tot Chinese technologie zullen aanhouden of geleidelijk zullen verdwijnen. Ook uit consultatie van TU Delft bleek dat 20MW een redelijke aanname zou zijn.

De technische aannames voor de gekozen turbine en de indeling van het windgebied zijn samengevat in Tabel 5. De 20MW turbine heeft een rotor diameter van 280 meter, een aspect ratio van 332W/m² en een ashoogte van 163 meter. Zowel de power curve als de thrust curve zijn gebaseerd op de 15MW en 22MW IEA referentieturbines.

Tabel 5: Windpark aannames

Parameter	Aanname	Referentie
Windturbine		
WTG capaciteit	20MW	AFRY
Rotor diameter	280m	AFRY
Aspect ratio	332W/m ²	AFRY
Ashoogte	163m	AFRY
Power curve	Theoretisch	AFRY

⁴ GE was oorspronkelijk van plan om een 18MW-versie van de Haliade-X turbine te ontwikkelen, maar begin 2024 heeft het bedrijf besloten deze plannen te laten varen. Vestas blijft zich voorlopig richten op de ontwikkeling en productie van 15MW-turbines, zoals de V236-15MW.

⁵ Het Chinese Mingyang Smart Energy heeft een contract getekend met TÜV NORD om zijn MySE18.X-260 te certificeren, waarvan het bedrijf beweert dat het momenteel de krachtigste offshore windturbine ter wereld is.

⁶ Een offshore windturbine van 26MW is van de productielijn gerold door het Chinese Dongfang Electric Corporation (DEC) in Fuzhou, in de provincie Fujian.

⁷ Er wordt door KGG onderzocht of hogere turbines haalbaar zijn, rekening houdend met vliegveiligheid (max 1000ft).

Thrust curve	Theoretisch	AFRY
<u>Indeling van het windgebied</u>		
Totale capaciteit	-	-
Turbineafstand	5 bij 5 rotordiameter(RD)	Vast rechthoekig raster, in overleg met de begeleidingsgroep
Dichtheid	10,5MW/km ²	Resultaat van gekozen turbine afstand en overeenkomstig Programma Noordzee 2022-2027.
Oriëntatie van het raster	Noord/zuid	In overleg met de begeleidingsgroep

De turbines zijn in het windgebied geplaatst in een vast rechthoekig raster met een turbineafstand van vijf keer de rotordiameter (5RD), wat resulteert in een turbine dichtheid van 10,5MW/km². De rasteroriëntatie is noord-zuid, om optimaal rekening te houden met de dominante windrichting uit het west-zuidwesten. Daarnaast is een reductie van 15% van het beschikbare windgebied toegepast om ruimte vrij te houden voor toekomstige infrastructuur, zoals kabels, leidingen en HVDC- en waterstofplatformen. Ook zijn de intreedzones A en B (weergegeven in Figuur 2), elk met een breedte van 1500 meter, als open ruimte meegenomen.

Voor de conversie van wisselstroom naar gelijkstroom wordt uitgegaan van gestandaardiseerde netaansluitingssystemen ontwikkeld door TenneT, namelijk 2GW-platformen voor hoogspanningsgelijkstroom (HVDC). Voor de conversie van wisselstroom naar waterstof wordt uitgegaan van elektrolyserplatformen met een capaciteit van 500MW. Deze platformen bevinden zich nog in de ontwikkelingsfase. In de GW-berekeningen is er geen rekening gehouden met een minimale kavelgrootte. Tabel 6 geeft een overzicht van de aannames voor de HVDC- en waterstofplatformen, evenals voor de bijbehorende pijpleidingen, kabels en corridors.

Tabel 6: Aannames platformen, pijpleidingen, kabels en corridors

Parameter	Aanname	Referentie
<u>Gelijkstroom platform</u>		
Capaciteit	2GW	TenneT
Afmetingen	106x77x41 (LxBxH)	TenneT
Afstand tussen gelijkstroom platformen	1km	TenneT/Gasunie
<u>Waterstof platform</u>		
Capaciteit	500MW	TenneT/Gasunie
Afmetingen	70x110x40 (LxBxH)	TenneT/Gasunie
Afstand tussen waterstof platformen	100m	TenneT/Gasunie
<u>Obstakel vrije zones</u>		
Platform(s) van TenneT	1100m	TenneT
Pijpleidingen obstakelvrije zone	500m	Programma Noordzee
Kabels obstakelvrije zone	500m	Programma Noordzee

4.2 Aanpak energieopbrengst berekeningen

De energieopbrengsten zijn gebaseerd op een windklimaat dat representatief is voor de lange termijn. Dit windklimaat is afgeleid van de ERA5-dataset, ontwikkeld en verstrekt door het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5 biedt een uitgebreide set meteorologische parameters, gemodelleerd over de periode vanaf 1950 tot bijna real-time.

De ERA5-gegevens zijn berekend met een ruimtelijke resolutie van 31 km en een temporele resolutie van één uur, wat een gedetailleerde en betrouwbare basis biedt voor de energieopbrengstberekeningen. Er is geen gebruik gemaakt van meetcampagnes in deze analyses, de berekeningen zijn volledig gebaseerd op modelgegevens uit de ERA5-dataset.

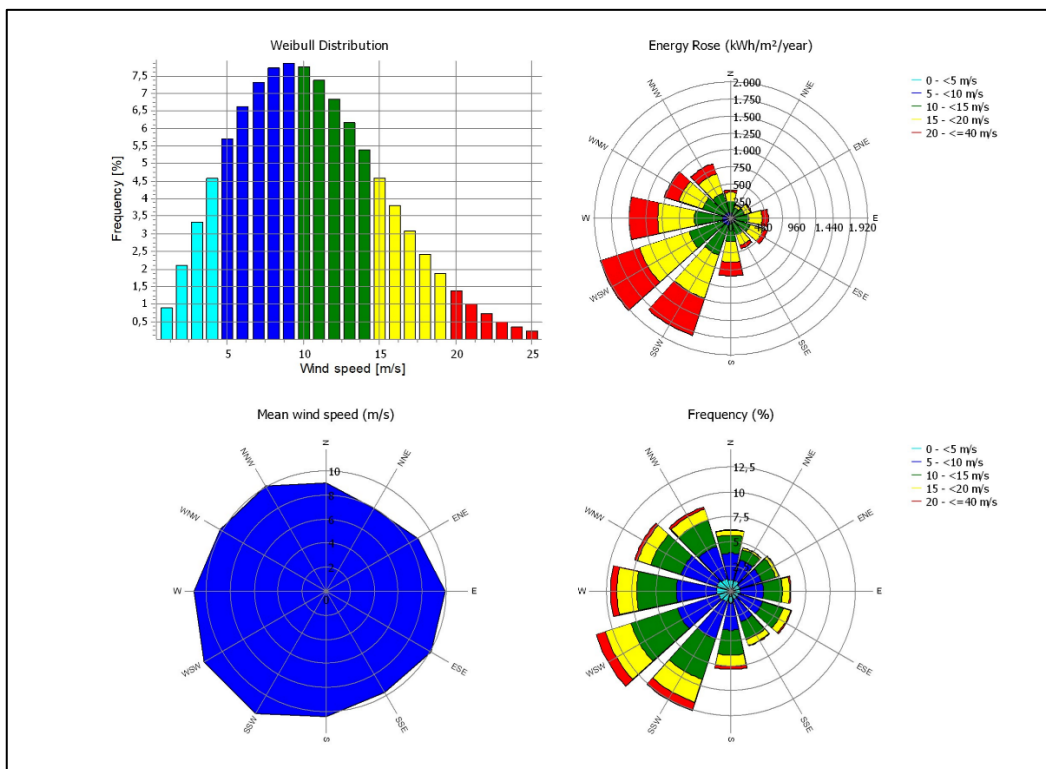
Tabel 7 geeft een overzicht van de Weibull-parameters die het windklimaat in het centrum van zoekgebied 6/7 karakteriseren. De dominante windrichting is west-zuidwest (WZW), wat cruciaal is voor de optimale oriëntatie van de windparken. De jaargemiddelde windsnelheid op een hoogte van 163 meter bedraagt 10,43 m/s, wat wijst op uitstekende windomstandigheden voor offshore windenergie.

De Weibull-schaalparameter (A) is vastgesteld op 11,78 en de vormparameter (k) op 2,232, waarmee de verdeling en variatie in windsnelheid over een langere termijn worden beschreven. Deze parameters vormen de basis voor de energieopbrengstberekeningen in zoekgebied 6/7.

Tabel 7: Windparameters voor Zoekgebied 6/7

Parameter	Resultaat
Dominante windrichting	WZW
Jaargemiddelde windsnelheid (lange-termijn) op 163m hoogte [m/s]	10,43
Weibull-schaalparameter op 163m hoogte (A)	11,78
Weibull-vormparameter op 163m hoogte (k)	2,232

Figuur 13 geeft een grafische weergave van het windklimaat in zoekgebied 6/7. De windparameters en het windklimaat voor Lageland en Doordewind zijn in de Bijlage A opgenomen.



Figuur 13: Grafische samenvatting van het windklimaat van Zoekgebied 6/7 op 100 meter

Nadat de posities van de windturbines en de bekabeling waren bepaald, is de bruto jaarlijkse energieopbrengst voor elke windturbine berekend met behulp van WindPRO en WASP.

De netto jaarlijkse energieopbrengst wordt berekend door verliesfactoren af te trekken van de bruto jaarlijkse energieopbrengst via de relatie $(1-\text{verlies}_1) \cdot (1-\text{verlies}_2) \cdot (1-\dots)$. De verliesfactoren die worden meegenomen zijn zogverliezen en productieverliezen.

Zogverliezen

De dominante verliesfactor voor een offshore windpark in Zoekgebied 6/7 is het zogeffect. Het zogeffect wordt omschreven als de geaggregeerde invloed op de energieopbrengst van het windpark, die het gevolg is van de veranderingen in windsnelheid door de invloed van de turbines op elkaar. Interne zogverliezen betreffen de onderlinge invloed van turbines van het windpark op elkaar.

Naast interne zogverliezen spelen externe zogverliezen een belangrijke rol bij de energieopbrengst van windparken. Externe zogverliezen ontstaan door de invloed van nabijgelegen bestaande en geplande windparken, zowel binnen Nederland als in aangrenzende landen. Voor deze analyse zijn alle windparken in de omgeving die vóór 2031 operationeel zullen zijn, meegenomen. Hierbij zijn aannames gemaakt over turbinecapaciteit en layout, zoals weergegeven in Bijlage C.

Het effect van externe zogverliezen is van grote invloed op de netto energieopbrengst van een windpark. Hoewel de interne zogverliezen doorgaans dominant zijn, kunnen externe zogverliezen deze aanzienlijk versterken, afhankelijk van de dichtheid en grootte van omliggende parken.

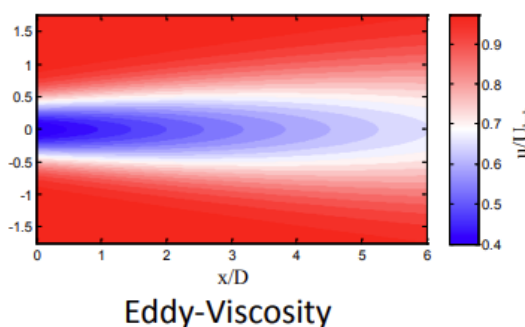
Voor zoekgebied Lageland zijn de externe zogverliezen niet meegenomen in de berekeningen. Hier is voor gekozen omdat de gebiedsindeling nog volledig onzeker is,

wat het lastig maakt om de invloed van externe zogverliezen betrouwbaar vast te stellen.

Zogeffecten kunnen met verschillende modellen berekend worden, die van elkaar verschillen in complexiteit. Voor deze studie is er met één zogmodel en één blokkage model doorgerekend, namelijk:

Zogmodel 1: Ainslie (Eddy-viscosity) met Deep Array Correction (DAC)

Het Ainslie-zogmodel is gebaseerd op de Reynoldsgemiddelde Navier-Stokes vergelijkingen. Het Ainslie-model heeft beperkingen bij het simuleren van grote windparken, waarbij het de zogeffecten vaak onderschat. In WindPro is daarom het Ainslie-model uitgebreid met Deep Array Correction (DAC) om deze tekortkomingen te compenseren. De zogverspreiding is niet lineair maar volgt een Gaussische verdeling (zie Figuur 14). Voor de modellering van blokkage-effecten wordt gebruikgemaakt van het lineaire model van Forsting (2017) wordt gebruikt als blokkagemodel.



Figuur 14: National Renewable Energy Laboratory (NREL) - A Review of Wind Turbine Wake Models and Future Directions, 2013 North American Wind Energy Academy (NAWEA) Symposium, August 6, 2013, Matthew J. Churchfield.

Blokkage model: Forsting (2017)

Het Forsting (2017) blokkagemodel biedt een gedetailleerde benadering om de voorwaartse windafname te modelleren die optreedt voor een windturbine als gevolg van de verstoring van de luchtstroom door de rotor, wat resulteert in een nauwkeuriger schatting van de windsnelheden en energieopbrengst. Het model is geoptimaliseerd voor offshore windparken en integreert naadloos met geavanceerde zogmodellen zoals Eddy Viscosity.

De scope van deze studie omvat lineaire zogmodellen en sluit het gebruik van computationeel intensieve stromingsmodellen (zoals CFD en LES) uit.

Productieverliezen

Verder zijn productieverliezen in deze studie meegenomen, waarbij rekening is gehouden met verschillende categorieën van verliezen, namelijk onbeschikbaarheid, prestatieverliezen, elektrische verliezen, en milieufactoren zoals bladdegradatie en ijsvorming. Deze factoren zijn in de berekeningen opgenomen en bieden een compleet beeld van de verschillende productieverliezen binnen het windpark.

Bijzondere methode voor energieopbrengstberekening in zoekgebied 6/7

Voor zoekgebied 6/7 is een unieke methode toegepast om de energieopbrengst te berekenen. Omdat de exacte locaties van corridors voor kabels, leidingen en HVDC- en

waterstofplatformen op het moment van berekening nog niet bekend waren, is gekozen voor een gemiddelde reductie van 15% van het beschikbare windgebied. Hierdoor blijft elke gebiedsindeling van zoekgebied 6/7 vergelijkbaar en heeft deze onzekerheid geen invloed op de berekening van het vermogen.

Eerst is het volledige gebied ingevuld met turbines en zijn de zogverliezen per turbine en de totale energieopbrengst bepaald. Vervolgens is de 15% van de turbines met de hoogste zogverliezen, zowel in het oostelijke als westelijke deel van het windgebied, uit deze totale energieopbrengst verwijderd. Dit betekent dat de energieopbrengst van deze turbines niet is meegenomen in de totale opbrengst, wat als een optimistische benadering kan worden beschouwd. Echter, omdat de zogverliezen die deze verwijderde turbines veroorzaakten op de omliggende turbines wél in de berekening zijn behouden, wordt dit gezien als een realistische benadering.

4.3 Energieopbrengst resultaten

In deze paragraaf worden de energieopbrengstresultaten van de verschillende gebiedsindelingen geanalyseerd.

Een relatieve LCoE-vergelijking kenmerkt zich door het hebben van een referentie. In afstemming met IenW is de referentie IJmuiden Ver Alpha geselecteerd. Daarom worden in deze paragraaf ook de energieopbrengstresultaten van deze referentie gepresenteerd, deze worden verder niet besproken.

De analyse legt de nadruk op zogverliespercentages (%), de capaciteitsfactor (%) en de energieopbrengst (GWh/jaar). Het zogverliespercentage geeft aan hoeveel energieopbrengst verloren gaat door nabijgelegen turbines, terwijl de capaciteitsfactor de verhouding weergeeft tussen de werkelijke en de maximale mogelijke energieopbrengst. Een hogere energieopbrengst leidt doorgaans tot een lagere LCoE, waardoor deze parameters cruciaal zijn voor de analyse. De resultaten van de verschillende gebiedsindelingen van zoekgebied 6/7, Doordewind en Lagelanden worden vergeleken met hun eigen gebiedsindelingen. Hiermee wordt de invloed van ruimtelijke keuzes op de energieopbrengst, zogverliezen en capaciteitsfactor inzichtelijk gemaakt.

Zoekgebied 6/7

Tabel 8 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken en energieopbrengstresultaten van de gebiedsindelingen die zijn doorgerekend. De gebiedsindelingen van zoekgebied 6/7 verschillen in windgebiedoppervlakte, aantal turbines, en de bijbehorende energieopbrengsten en verliezen. De analyse toont duidelijk de invloed van ruimtelijke indelingen en het vermogen van een gebiedsindeling op de capaciteitsfactor.

Uiterste

De bruto energieopbrengst in zoekgebied 6/7 groeit proportioneel met de grootte van het windgebied en het vermogen, variërend van 59,6TWh/j bij #0 (Uiterste) tot 145,1TWh/j bij #33 (Uiterste). Tegelijkertijd nemen de zogverliezen toe naarmate het vermogen stijgt. De gemiddelde zogverliezen lopen op van 21,4% bij #0 (Uiterste) (met een vermogen van 10,8GW) tot 28,1% bij #33 (Uiterste) (26,6GW). Dit verschil in zogverliezen is significant. De dalende capaciteitsfactor weerspiegelt deze trend, variërend van 44,6% bij #0 (Uiterste) tot 40,8% bij #33 (Uiterste).

Getrechterde varianten met 5NM cirkels en smalle en brede open zone

Bij een kleinere open zone van #1-mijnbouw nemen de grootte van het windgebied en het vermogen toe ten opzichte van #0-update, die een grotere open zone heeft. Bij #1-mijnbouw bedraagt de bruto energieopbrengst 89,3TWh/j, terwijl dit bij #0-update afneemt tot 78,9TWh/j. Deze daling weerspiegelt de afname in vermogen en grootte van het windgebied. Tegelijkertijd nemen de zogverliezen licht af, van 24,2% bij #1-mijnbouw naar 24,0% bij #0-update. De netto energieopbrengst daalt van 61,8TWh/j bij #1-mijnbouw naar 54,7TWh/j bij #0-update, wat aangeeft dat het lagere vermogen, leidt tot een significante daling in netto energieopbrengst. De capaciteitsfactor blijft met 43,0% bij #1-mijnbouw en 43,1% bij #0-update vrijwel onveranderd.

Getrechterde varianten met 2,5NM cirkels en smalle en brede open zone

Bij #1 (getrechterde variant) neemt de grootte van het windgebied en het vermogen toe ten opzichte van #8 (getrechterde variant), wat te danken is aan een kleinere open zone bij #1 in vergelijking met #8. Bij #1 bedraagt de bruto energieopbrengst

118,4TWh/j, terwijl dit bij #8 lager is met 104,2TWh/j. Tegelijkertijd nemen de zogverliezen toe, van 25,6% bij #8 naar 26,6% bij #1. De netto energieopbrengst stijgt desondanks van 70,7TWh/j bij #8 naar 79,4TWh/j bij #1, wat aangeeft dat het extra vermogen, door een kleinere open zone, ondanks hogere zogverliezen resulteert in een significante toename van de netto energieopbrengst. De capaciteitsfactor neemt daarentegen af, van 42,2% bij #8 naar 41,7% bij #1, wat de invloed van de hogere zogverliezen weerspiegelt.

Bij een kleinere open zone zullen de zogverliezen toenemen, maar tegelijkertijd zal ook de netto energieopbrengst stijgen. Bij een grotere open zone zullen de zogverliezen juist afnemen, samen met de netto energieopbrengst. Voor de business case van windparken in zoekgebied 6/7 is een grotere open zone gunstiger, omdat dit leidt tot lagere zogverliezen en een hogere energieopbrengst. Voor het opwekken van meer groene stroom op systeemniveau is echter een kleinere open zone voordeliger, omdat dit resulteert in een hogere totale energieopbrengst, ondanks de hogere zogverliezen.

Wel of niet extra ruimte voor mijnbouw

Het verschil tussen wel of geen extra ruimte voor mijnbouw kan geanalyseerd worden door variant #0-update te vergelijken met variant #8 (Getrechterde variant) en variant #1-mijnbouw met variant #1 (Getrechterde variant). Het is hierbij van belang te vermelden dat de prospect in F16 is verwijderd, waardoor de conclusies niet één op één te maken zijn.

De vergelijking tussen variant #0-update, waar extra ruimte voor mijnbouw wordt overwogen, en variant #8 (Getrechterde variant) toont een verschil in vermogen van 4,64GW. Dit resulteert in een netto energieopbrengst van 70,7 terawattuur per jaar voor variant #8 (Getrechterde variant), vergeleken met 54,7 terawattuur per jaar voor variant #0-update. De zogverliezen nemen met 1,6 procentpunt toe, van 24,0% bij variant #0-update naar 25,6% bij variant #8 (Getrechterde variant), wat een significante toename is.

De vergelijking tussen variant #1-mijnbouw, waar extra ruimte voor mijnbouw wordt overwogen, en variant #1 (Getrechterde variant) toont een verschil in vermogen van 5,3GW. Dit resulteert in een netto energieopbrengst van 79,4 terawattuur per jaar voor variant #1 (Getrechterde variant), vergeleken met 61,8 terawattuur per jaar voor variant #1-mijnbouw. De zogverliezen nemen met 2,4 procentpunt toe, van 24,2% bij variant #1-mijnbouw naar 26,6% bij variant #1 (Getrechterde variant), wat een significante toename is en groter dan bij de vergelijking tussen variant #0-update en variant #8 (Getrechterde variant). Bij hogere vermogens stijgen de zogverliezen meer.

Externe zogverliezen

Bij zoekgebied 6/7 is geen rekening gehouden met externe zogverliezen van naburige windparken, omdat deze pas na 2031 zullen worden ontwikkeld. In werkelijkheid zullen de zogverliezen toenemen als deze naburige windparken worden gerealiseerd, wat zal resulteren in hogere LCoE's. Dit effect zal met name merkbaar zijn in het oostelijke deel van zoekgebied 6/7, grenzend aan de Duitse zijde.

Tabel 8: Overzicht van de karakteristieken en energieopbrengst resultaten voor de vergelijkingsgebieden en de combinatievarianten

	Vergelijkingsgebieden		Combinatievarianten zoekgebied 6/7					
Results	IJV A	IJV B	#0 (Uiterste)	#0-update	=#8 (Getrechter de variant)	#1- mijnbouw	#1 (Getrechter de variant)	#33 (Uiterste)
Windgebied oppervlakte [km ²]	186	186	1,044	1,381	1,823	1,563	2,072	2,538
# aantal turbines	134	134	547	724	956	820	1,087	1,332
Turbine capaciteit [MW]	15	15	20	20	20	20	20	20
Totale capaciteit [MW]	2.010	2.010	10.940	14.480	19.120	16.400	21.740	26.640
Waterdiepte [m]	(29,0)	(27,6)	(43)	(44)	(44)	(44)	(45)	(45)
Turbine afstand [m]	1145	1145	1380	1380	1380	1380	1380	1380
Windpark dichtheid [MW/km ²]	10,8	10,8	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Gm wind snelheid [m/s]	10,0	10,0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4
Bruto energieopbrengst [GWh/j]	10.862	10.862	59.593	78.877	104.152	89.335	118.424	145.115
Gemiddelde zogverliezen [%]	24,6	25,9	21,4	24,0	25,6	24,2	26,6	28,1
Andere verliezen [%]	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
Totale verliezen [%]	31,2	32,4	28,3	30,7	32,1	30,8	33,0	34,3
Neto energieopbrengst [GWh/j]	7,478	7.344	42.742	54.699	70.722	61.808	79.387	95.285
Capaciteit factor [%]	42,5	41,7	44,6	43,1	42,2	43,0	41,7	40,8

Doordewind

Tabel 9 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken en energieopbrengstresultaten van de varianten van Doordewind. De Referentie-variant van Doordewind heeft een windgebiedoppervlakte van 200km² en een vermogen van 2GW. Deze variant heeft de laagste zogverliezen van alle varianten, met een gemiddelde van 21,3%, wat resulteert in een netto energieopbrengst van 7.873GWh per jaar. Hiermee heeft de Referentie-variant met 44,9% de hoogste capaciteitsfactor van de drie Doordewind varianten.

De +2GW-variant van Doordewind verdubbelt het windgebied tot 400km² en de capaciteit naar 4GW, wat resulteert in een netto energieopbrengst van 15.533GWh per jaar. De zogverliezen nemen echter toe tot 22,4%, een significante stijging van 3,3 procentpunt door het verdubbelde vermogen. De capaciteitsfactor neemt af met 1,9 procentpunt ten opzichte van de Referentie-variant.

De +4GW-variant vergroot het windgebied verder naar 553km² en verhoogt het vermogen naar 6GW, wat resulteert in een netto energieopbrengst van 22.362GWh per jaar. De windparkdichtheid neemt toe ten opzichte van de Referentie-variant en de +2GW-variant, van 10,0 naar 10,9MW/km², doordat het windgebied Doordewind en Doordewind-west niet meer ruimte kan bieden. Deze toename in dichtheid en vermogen resulteert in de hoogste zogverliezen van 25,5%, wat neerkomt op een stijging van 3,1 procentpunt. De capaciteitsfactor is afgenomen met 3,7 procentpunt ten opzichte van de Referentie-variant.

Deze resultaten tonen aan dat het vergroten van het windgebied en het vermogen leidt tot een hogere absolute netto energieopbrengst, maar ook tot hogere zogverliezen. De Referentie-variant scoort het beste in termen van capaciteitsfactor, terwijl de +2GW- en +4GW-varianten hogere energieopbrengsten bieden, maar tegen significant hogere zogverliezen.

Lagelander

De zogverliezen bij de Lagelander-variant bedragen gemiddeld 18,3%, wat aanzienlijk lager is dan bij de varianten van Doordewind. Dit verschil is deels te verklaren doordat externe zogverliezen niet zijn meegenomen in de energieopbrengstberekeningen. Daarnaast wordt verwacht dat Lagelander, vanwege de grotere afstand tot naburige windparken, ook in werkelijkheid lage externe zogverliezen zal kennen.

Omdat de uiteindelijke vorm van het windgebied Lagelander nog onbekend is en externe zogverliezen niet zijn meegenomen, kunnen de uiteindelijke energieopbrengsten nog aanzienlijk afwijken van de huidige resultaten.

Tabel 9: Doordewind en Lagelander karakteristieken en energieopbrengst resultaten

	Referentie		Doordewind			Lagelander
Results	IJV A	IJV B	Referentie	+2GW	+4GW	Lagelander
Windgebied oppervlakte [km ²]	186	186	200	400	553	200
# aantal turbines	134	134	100	200	300	100
Turbine capaciteit [MW]	15	15	20	20	20	20
Totale capaciteit [MW]	2.010	2.010	2.000	4.000	6.000	2.000
Waterdiepte [m]	(29,0)	(27,6)	(38)	(39)	(40)	(27)
Turbine afstand [m]	1145	1145	1380	1380	1340	1380
Windpark dichtheid [MW/km ²]	10,8	10,8	10,0	10,0	10,9	10,0
Gm wind snelheid [m/s]	10,0	10,0	10,5	10,5	10,5	10,2
Bruto energieopbrengst [GWh/j]	10.862	10.862	10.959	21.919	32.878	10.664
Gemiddelde zogverliezen [%]	24,6	25,9	21,3	22,4	25,5	18,3
Andere verliezen [%]	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
Totale verliezen [%]	31,2	32,4	28,2	29,1	32,0	25,4
Neto energieopbrengst [GWh/j]	7.478	7.344	7.873	15.533	22.362	7.961
Capaciteit factor [%]	42,5	41,7	44,9	44,3	42,5	45,4

5 Kostenanalyse (Levelized Cost of Energy)

Dit hoofdstuk beschrijft de kostenanalyse die in deze studie is uitgevoerd met een relatieve LCoE-vergelijking. Eerst worden de belangrijkste aannames voor de kosten van het windpark besproken, gevolgd door de aanpak voor het berekenen van de LCoE. Daarna worden de resultaten van de relatieve LCoE voor de verschillende layouts gepresenteerd.

5.1 Aannames voor windpark kosten

In Tabel 10 worden de belangrijkste kostenaannames van het offshore windpark kort toegelicht. Zoals vermeld in de algemene aanpak, zullen de meeste van deze posten geen invloed hebben op de relatieve LCoE verschillen tussen de verschillende layouts.

Tabel 10: Kostenaannames voor offshore windpark LCoE

Parameter	Veronderstelling	Referentie
Kapitaaluitgaven (CAPEX)		
Kosten van de turbine	Inclusief levering, transport en installatie en afhankelijk van de afstand tot de haven. Kosten zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
Fundatiemethode	Monopiles	Naar verwachting economisch gunstig in de beschouwde waterdieptes
Staalprijzen	Op basis van de laatste marktprijzen	AFRY prijsdatabase
Fundatie gewicht	Gebruik van formule die gebaseerd is op specifieke bodemomstandigheden en relatie waterdiepte en golfcondities. De formule is vertrouwelijk	AFRY fundatiemodel
Fundatie kosten	Inclusief levering, transport en installatie van funderingen en afhankelijk van de afstand tot de haven. Kosten zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
Parkbekabelingskosten	Gebaseerd op aluminium in de kabels. Kosten zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
Kosten voor kabelkruisingen	Niet meegenomen	AFRY prijsdatabase
Andere CAPEX	Diverse posten (bijvoorbeeld havenfaciliteiten en bouwbeheer). De kosten zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
CAPEX onvoorzien	Gebaseerd op marktconforme niveaus	AFRY prijsdatabase
Verzekeringen tijdens de bouw	Vertraging start, constructie all-risk, wettelijke aansprakelijkheid. Tarieven zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
Ontwikkelingsuitgaven (DEVEX)	Vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
Operationele uitgaven (OPEX)		
Beheerkosten	Op basis van een klein operationeel team	AFRY prijsdatabase
Turbine onderhoud	Gebruik van Service Maintenance Agreement (SMA) met turbineleverancier. Inclusief	AFRY prijsdatabase

	afhankelijkheid van de afstand tot de haven. Kosten zijn vertrouwelijk	
Verzekeringen tijdens operaties	Operationele all-risk, bedrijfsonderbreking, wettelijke aansprakelijkheid. Tarieven zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
Onderhoud van de installaties	Gebaseerd op de kosten van de onderhoudsdienst. De kosten zijn vertrouwelijk	AFRY prijsdatabase
OPEX-niveau voor onvoorziene uitgaven	Gebaseerd op marktconforme niveaus	AFRY prijsdatabase
Andere veronderstellingen		
Financiering	Project wordt gefinancierd op de balans	Meest representatief geacht
Vereist rendement op investering	Gebaseerd op marktconforme niveaus	Afry expert inschatting
Inkomsten	Niet vereist voor LCoE-berekeningen	-
Vereist rendement, required return on investment is ROI	7%	Afry expert inschatting
Gewogen gemiddelde kosten van kapitaal, WACC (Weighted Average Cost of Capital)	7%	Afry expert inschatting
Indexeringsniveaus	2% per jaar	AFRY prijsdatabase
Afschrijvingstermijn	35 jaar	Gebaseerd op Kavelbesluit windenergiegebied IJmuiden Ver
Vergunningstermijn	40 jaar	Gebaseerd op Kavelbesluit windenergiegebied IJmuiden Ver

De kostenaannames van Tabel 10 worden ingevoerd in het deel van de formule dat betrekking heeft op de kosten van het windpark en verdisconteerd op basis van het vereiste rendement gedurende de levensduur van het windpark. AFRY berekent de LCoE per variant door de verdisconteerde kosten te delen door de verdisconteerde energieopbrengst.

De energieopbrengst en de kosten worden berekend per windturbine. De verwachting is dat het verschil in zogverliezen de grootste invloed op de LCoE-verschillen zal hebben, terwijl de invloed van de overige parameters (namelijk gemiddelde waterdiepte en lengte van de parkbekabeling) relatief klein is.

Tabel 11: Belangrijkste variabele parameters en hun invloed op de LCoE

Parameter	Verwachte invloed op LCoE	
Zogverliezen	Groot	Verschild aanzienlijk tussen de varianten; beïnvloedt de <u>netto-opbrengst</u> .
Waterdiepte	Klein	Kleine verschillen tussen de varianten; beïnvloedt de <u>fundatiekosten</u> .
Parkbekabeling lengte	Klein	Kleine verschillen tussen varianten; beïnvloedt de <u>kabelkosten en kabelverliezen</u> .

Aantal kabelkruisingen	Niet meegenomen	Zeer beperkte verschillen tussen varianten; beïnvloedt de <u>kabelkosten en kabelverliezen</u> .
------------------------	-----------------	--

5.2 Aanpak LCoE

De LCoE-berekeningen zijn uitgevoerd met het AFRY LCoE-model. Dit model is in de loop der jaren doorontwikkeld, voor tal van projecten gebruikt en meerdere malen gevalideerd voor projecten waaraan AFRY heeft gewerkt. Vanwege de diepgaande en diverse marktinzichten die AFRY heeft opgedaan in offshore windprojecten, is dit model en de inputs ervan bijzonder goed uitgerust voor het uitvoeren van LCoE-vergelijkingsstudies.

Voor deze studie wordt aangenomen dat het windpark op eigen vermogen van een ontwikkelaar wordt gefinancierd (een alternatieve aanpak zou zijn om uit te gaan van projectfinanciering⁸). Deze benadering geeft de meest zuivere benadering van de LCoE van de offshore windparken.

De definitie van Levelized Costs of Energy van Wikipedia is:

De LCoE is de netto contante waarde van de energiekosten per eenheid energie gedurende de levensduur van de installatie. De LCoE wordt vaak gebruikt als indicatie voor de gemiddelde prijs die de installatie op een markt moet ontvangen om tijdens zijn levensduur kostendeekkend te zijn.

De LCoE wordt daarom weergegeven door de volgende formule (eenvoudige vorm):

$$LCoE = \frac{\text{Sum of costs of windfarm over lifetime (in euro)}}{\text{Total produced electricity (MWh)}}$$

Wanneer de verdiscontering van de kasstromen wordt meegerekend, ziet de gedetailleerde formule er als volgt uit:

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Production_t}{(1+r)^t}}$$

⁸ Een projectfinancieringsaanpak voor de berekening van een LCoE voor offshore-windenergie zou ook financieringskosten bevatten, aangezien bij projectfinanciering gebruik wordt gemaakt van bankleningen om een groot deel van de CAPEX van het project te financieren. De LCoE van een windpark met projectfinanciering zal dus ook deze kosten bevatten. Aangezien wij ons in deze studie voornamelijk willen richten op de kosten/kapitaal van het windpark, hebben wij gekozen voor een balansfinancieringsbenadering. Deze aanpak sluit goed aan bij de manier waarop verschillende grote ontwikkelaars hun windprojecten financieren.

Met⁹ ;

n = totaal aantal jaren

t = jaar

r = vereist rendement/WACC

CAPEX = kapitaaluitgaven (investeringen)

OPEX = operationele uitgaven

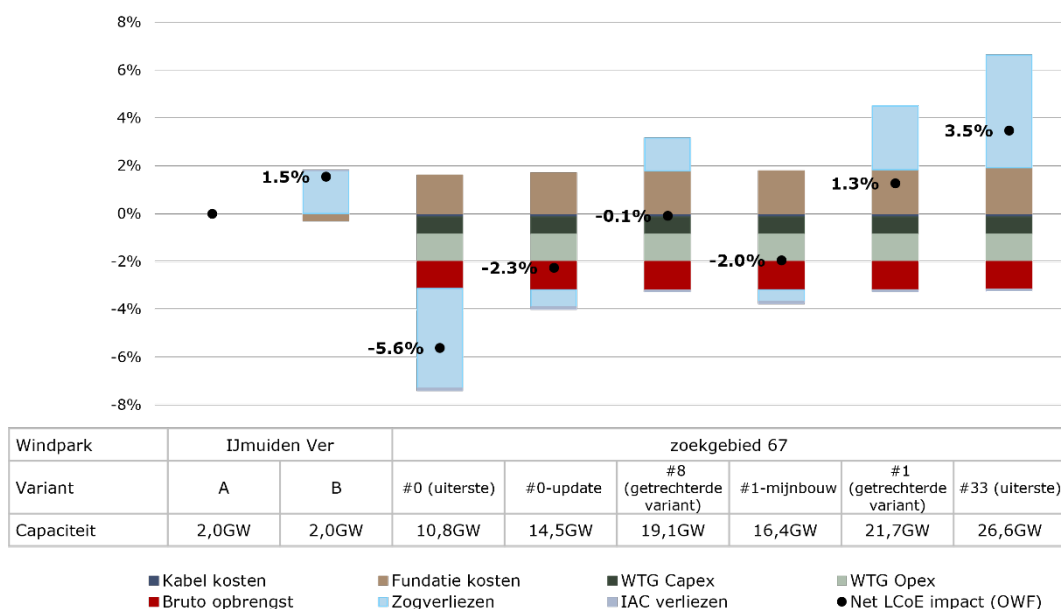
5.3 Relatieve LCoE resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de relatieve LCoE vergelijkingen beschreven.

Een LCoE-analyse kenmerkt zich door het gebruik van een referentie. In afstemming met IenW is de referentie IJmuiden Ver Alpha geselecteerd. Daarom wordt in deze paragraaf ook de LCoE-data van deze referentie gepresenteerd. De analyse van zoekgebied 6/7, Doordewind en Lagelanden ten opzicht van IJV A wordt in de Bijlage E beschreven.

zoekgebied 6/7

Figuur 15 en Tabel 12 presenteren de resultaten van de relatieve LCoE-vergelijking van de Zoekgebied 6/7 varianten ten opzichte van vergelijkingsgebied IJmuiden Ver Alpha.



Figuur 15: Relatieve LCoE verschillen van IJV B en Zoekgebied 6/7 ten opzichte van IJV A

⁹ De LCoE zal (in de meeste literatuurgevallen) bovendien worden gecorrigeerd voor belastingkosten, waardoor de LCoE een LCoE na belasting wordt (niet meegenomen in bovenstaande formule).

Tabel 12: Relatieve LCoE verschil van Zoekgebied 6/7 varianten ten opzichte van IJV A en de bijdragen aan het netto LCoE verschil door de verschillende parameters

	A	B	#0 (Uiterste)	#0- update	#8 (GV)	#1- mijnbouw	#1 (GV)	#33 (Uiterste)
Netto LCoE verschil (%)	-	1.5	-5.6	-2.3	-0.1	-2.0	1.3	3.5
Kabel kosten (%)	-	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
Fundatie kosten (%)	-	-0.3	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9
WTG Capex (%)	-	0.0	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
WTG Opex (%)	-	0.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1
Bruto energie- opbrengst (%)	-	0.0	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
Zogverliezen (%)	-	1.8	-4.2	-0.7	1.4	-0.5	2.7	4.7
IAC verliezen (%)	-	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

Uit de resultaten blijkt dat de zogverliezen de meest dominante parameter is die bijdraagt aan de netto LCoE-verschillen, met een variatie tussen de varianten van -4,2% tot 4,7%.

De invloed van overige parameters op de netto LCoE verschillen, zoals kostenparameters, blijft nagenoeg consistent tussen de varianten. Binnen de varianten is er slechts een klein verschil in invloed van fundatiekosten op de netto LCoE verschillen te zien, wat wordt veroorzaakt door de grotere waterdiepte in het midden van het gebied in vergelijking met de randen.

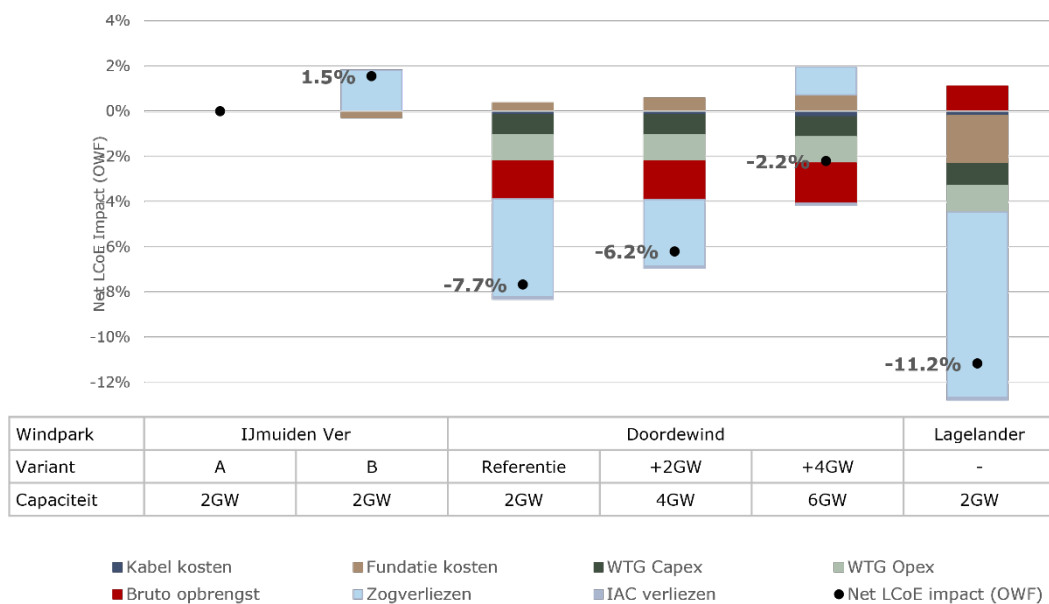
Als gevolg van de dominante invloed van de zogverliezen en de kleine invloed van de overige parameters op de onderlinge LCoE-verschillen komen deze onderlinge LCoE resultaten van de varianten van Zoekgebied 6/7 sterk overeen met de eerder gepresenteerde resultaten van de energieopbrengsten zoals beschreven in paragraaf 4.3. Variant #0-update heeft de laagste en variant #33 de hoogste LCoE binnen de varianten van zoekgebied 6/7.

Doordewind en Lageland

Figuur 16 en Tabel 13 presenteren de relatieve vergelijking van de LCoE voor de varianten van Doordewind en Lageland ten opzichte van referentievariant IJV A. Net als bij zoekgebied 6/7 worden de verschillen tussen de varianten voornamelijk veroorzaakt door variaties in de zogverliezen. Voor de Doordewind-varianten variëren de invloed van de zogverliezen op de netto LCoE verschillen van -4,3% bij de Referentie-variant tot +1,2% bij de +4GW-variant, terwijl dit voor Lageland -8,2% is.

De invloed van de overige parameters op de netto LCoE verschillen blijven nagenoeg consistent tussen de varianten, met uitzondering van de fundatiekosten. Bij Doordewind varieert de invloed van de fundatiekosten van +0,4% bij de Referentie-variant, tot +0,6% bij de +2GW-variant en +0,7% bij de +4GW-variant. Bij Lageland zijn de fundatiekosten daarentegen aanzienlijk lager door de relatief lage waterdiepte in het gebied, wat resulteert in een invloed van -2,1% door de fundatiekosten op de netto LCoE verschillen.

Als gevolg van de dominante invloed van de zogverliezen en de beperkte impact van andere parameters op de onderlinge LCoE-verschillen, vertonen de LCoE-resultaten van de varianten van Doordewind en Lagelandster sterke overeenkomsten met de eerder gepresenteerde energieopbrengstresultaten. Voor een uitgebreide analyse wordt verwezen naar paragraaf 4.3.



Figuur 16: Relatieve LCoE verschillen Doordewind en Lagelandster ten opzichte van referentievariant IJV A

Tabel 13: Relatieve LCoE verschillen Doordewind en Lagelandster ten opzichte van referentievariant IJV A en de bijdragen aan het netto verschil door de verschillende parameters

Variant	A	B	referentie	+2GW	+4GW	Lagelandster
Net LCoE verschil (OWF) (%)	-	1.5	-7.7	-6.2	-2.2	-11.2
Kabel kosten (%)	-	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
Fundatie kosten (%)	-	-0.3	0.4	0.6	0.7	-2.1
WTG Capex (%)	-	0.0	-0.9	-0.9	-0.9	-1.0
WTG Opex (%)	-	0.0	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
Bruto energieopbrengst (%)	-	0.0	-1.7	-1.7	-1.7	1.1
Zogverliezen (%)	-	1.8	-4.3	-2.9	1.2	-8.2
IAC verliezen (%)	-	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

Conclusies

Het doel van deze studie was om het vermogen van zoekgebied 6/7, Doordewind en Lagelander te analyseren voor de ontwikkeling van windenergie, rekening houdend met ruimtelijke beperkingen en andere sectorale belangen. Naast het vermogen zijn ook de energieopbrengst en de Levelized Cost of Energy (LCoE) onderzocht.

De analyse toont aan dat elk van deze gebieden unieke kansen biedt voor windenergieontwikkeling, maar ook specifieke uitdagingen kent.

Zoekgebied 6/7

De varianten laten zien dat het vermogen voor windenergie varieert van 10,8GW tot 26,6GW, afhankelijk van de balans tussen ruimtelijke belangen en windenergieambities. Naarmate het vermogen toeneemt, stijgen ook de zogverliezen, met een maximum van 28,1% in de variant met het grootste vermogen (#33 (uiterste)). Dit heeft een directe impact op de business case van windparken in het gebied, zoals blijkt uit de LCoE-resultaten.

De fundatiekosten variëren licht tussen de varianten, voornamelijk door de hogere waterdieptes in het midden van zoekgebied 6/7. De invloed van overige LCoE-parameters, zoals kabelkosten, bruto-energieopbrengst en WTG-kosten, blijft nagenoeg consistent tussen de varianten, wat de onderlinge relatieve verschillen voornamelijk toeschrijft aan zogverliezen en in beperkte mate de fundatiekosten.

Voor de business case van windparken in zoekgebied 6/7 is een grotere open zone gunstiger, omdat dit leidt tot lagere zogverliezen en dus een hogere energieopbrengst. Voor het opwekken van meer groene stroom op systeemniveau is echter een kleinere open zone gunstiger, omdat dit resulteert in een hogere totale energieopbrengst, ondanks de hogere zogverliezen.

Bij een toekomstige indeling van zoekgebied 6/7 in kavels zullen de energieopbrengsten en LCoE per kavel aanzienlijk verschillen, aangezien sommige kavels gunstiger liggen qua windrichting en lagere zogverliezen. Om een eerste inschatting te krijgen in deze verschillen is dit in een andere studie¹⁰ door AFRY onderzocht.

Doordewind

De analyse van Doordewind toont aan dat het vermogen varieert van 2GW in de Referentie-variant tot 6GW in de +4GW-variant, waarbij de omvang van het windgebied en de dichtheid van de turbines de belangrijkste factoren zijn die de resultaten beïnvloeden.

De zogverliezen lopen op van 21,3% bij de Referentie-variant tot 25,5% bij de +4GW-variant, wat een direct gevolg is van een hoger vermogen.

De fundatiekosten nemen licht toe met het vermogen, variërend van +0,4% bij de Referentie-variant tot +0,7% bij de +4GW-variant, wat wordt veroorzaakt door de grotere waterdieptes in Doordewind-west.

Lagelander

Voor Lagelander is slechts één variant doorgerekend, waardoor er geen relatieve conclusies te trekken zijn tussen varianten. De zogverliezen bij deze variant bedragen

¹⁰ LCoE kavelstudie zoekgebied 6/7

gemiddeld 18,3%, exclusief externe zogverliezen. Omdat de uiteindelijke ligging en vorm van het windgebied Lagelanders nog onbekend is en externe zogverliezen niet zijn meegenomen, kunnen de uiteindelijke energieopbrengsten nog aanzienlijk afwijken van de huidige resultaten.

Aanbevelingen

Op basis van de conclusies adviseert AFRY om aanvullende studies uit te voeren naar externe zogverliezen van windparken die na 2031 worden ontwikkeld. Dit is essentieel om de impact op de netto energieopbrengst nauwkeuriger te kwantificeren voor zoekgebied 6/7 en Lageland en toekomstige LCoE-berekeningen realistischer te maken. Voor zoekgebied 6/7 zal de invloed van externe zogverliezen met name merkbaar zijn aan de oostzijde, grenzend aan de Duitse windparken. Voor Lageland hangt de mate van externe zogverliezen sterk af van de uiteindelijke gebiedsindeling.

Daarnaast adviseert AFRY om de invloed van layoutoptimalisaties te onderzoeken, zowel voor de turbinelayout als de kabellayout. Een geoptimaliseerde layout kan de energieopbrengst verhogen en kabelkosten en -verliezen minimaliseren. Dit onderzoek biedt waardevolle inzichten in hoe layoutoptimalisatie de prestaties van grootschalige ontwikkeling van offshore windparken kan verbeteren.

Voor Lageland wordt aanbevolen om verschillende gebiedsindelingen te analyseren, met specifieke aandacht voor ruimtelijke indelingen die rekening houden met mijnbouw, scheepvaart en andere sectorale belangen. Dit onderzoek moet gericht zijn op het verkrijgen van een beter inzicht in hoe deze factoren de energieopbrengst en de LCoE beïnvloeden.

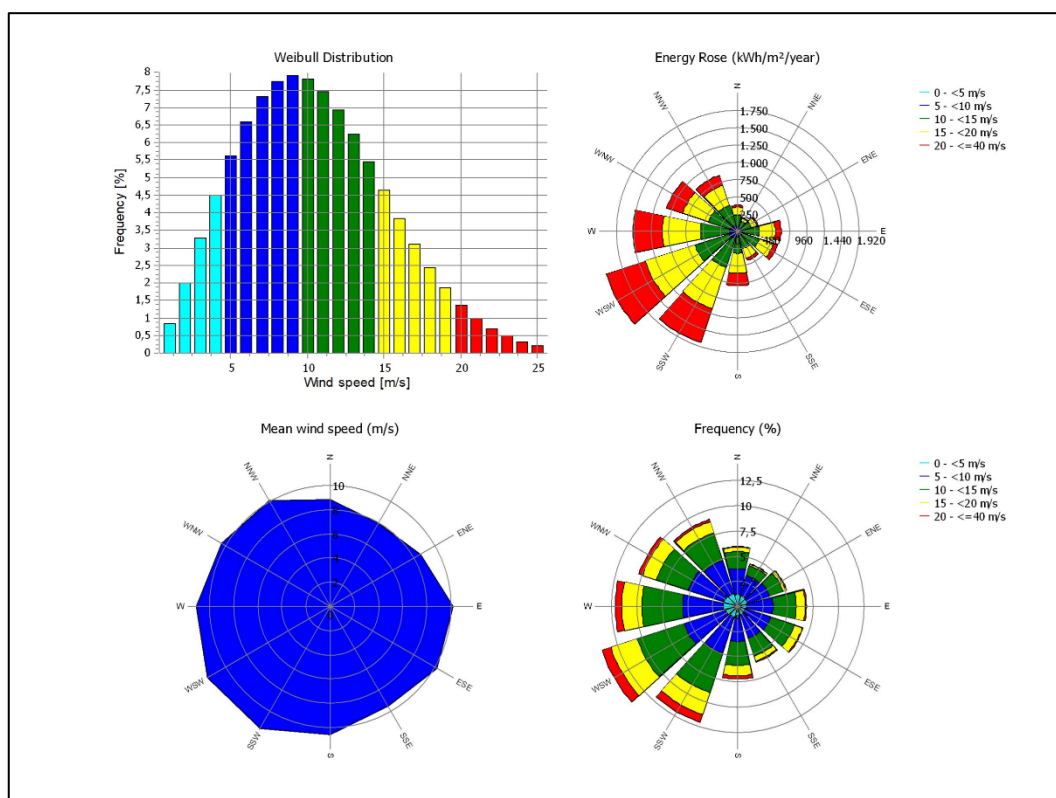
Verder adviseert AFRY om de invloed van windparkontwerpkeuzes te onderzoeken, waaronder de selectie van turbines en kabels. Specifiek wordt aanbevolen om de impact van verschillende turbinecapaciteiten, zoals toekomstige modellen boven de 20MW, te analyseren op de netto energieopbrengst, interne zogverliezen en fundatiekosten. Tegelijkertijd is het belangrijk om verschillende kabeltechnologieën, zoals 66kV versus 132kV, te bestuderen. Deze ontwerpkeuzes kunnen een gunstig effect hebben op de LCoE door de energieopbrengst te verhogen en de verliezen te verlagen.

Tot slot wordt aanbevolen om de rol van energie-infrastructuur, zoals TenneT's 2GW HVDC-transformatorstations en waterstofplatformen (0,5GW), verder te analyseren. Dit onderzoek moet zich richten op hoe deze stations kunnen bijdragen aan het minimaliseren van transmissieverliezen en hoe hun locatie en ontwerp de efficiëntie van kabelroutes en de totale energieopbrengst beïnvloeden. Daarnaast is het van belang om de potentiële voordelen van een gecombineerde elektrische en waterstofgebaseerde infrastructuur te evalueren, zodat toekomstige offshore energieopwekking optimaal kan worden geïntegreerd in het bredere energiesysteem.

Bijlage A: windklimaat

Tabel 14: Windparameters voor Doordewind

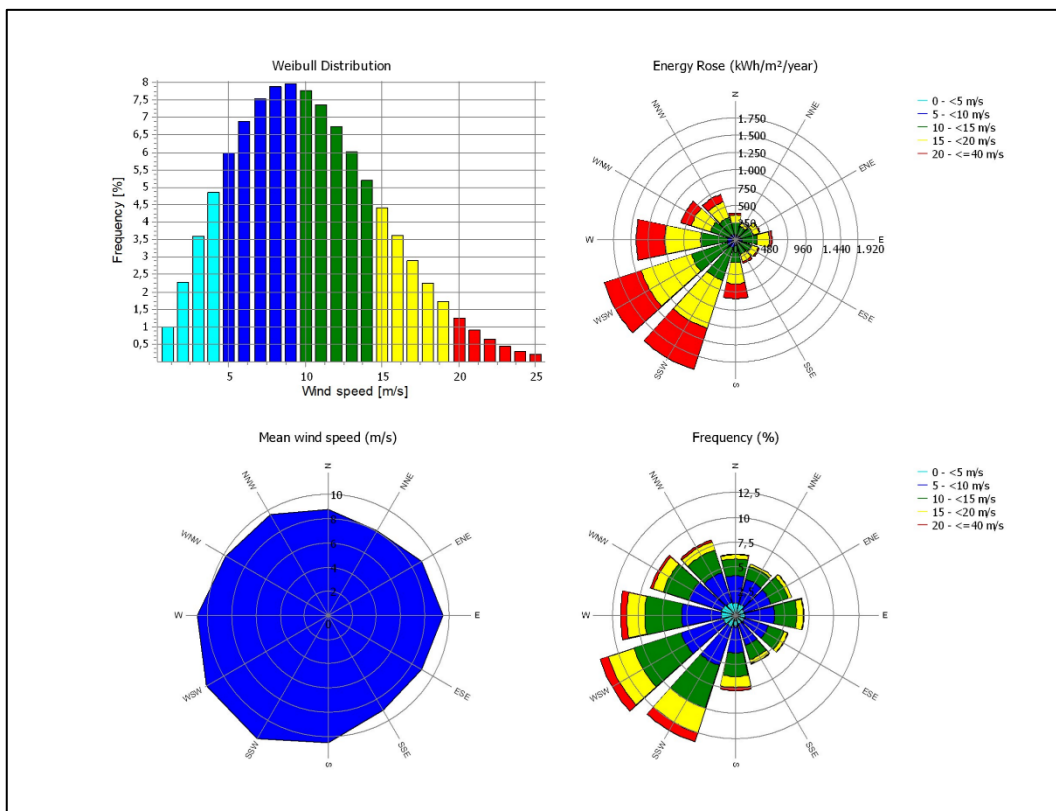
Parameter	Resultaat
Dominante windrichting	WZW
Jaargemiddelde windsnelheid (lange-termijn) op 163m hoogte [m/s]	10,45
Weibull-schaalparameter op 163m hoogte (A)	11,79
Weibull-vormparameter op 163m hoogte (k)	2,260



Figuur 17: Grafische samenvatting van het windklimaat van Doordewind op 163 meter

Tabel 15: Windparameters voor Lageland

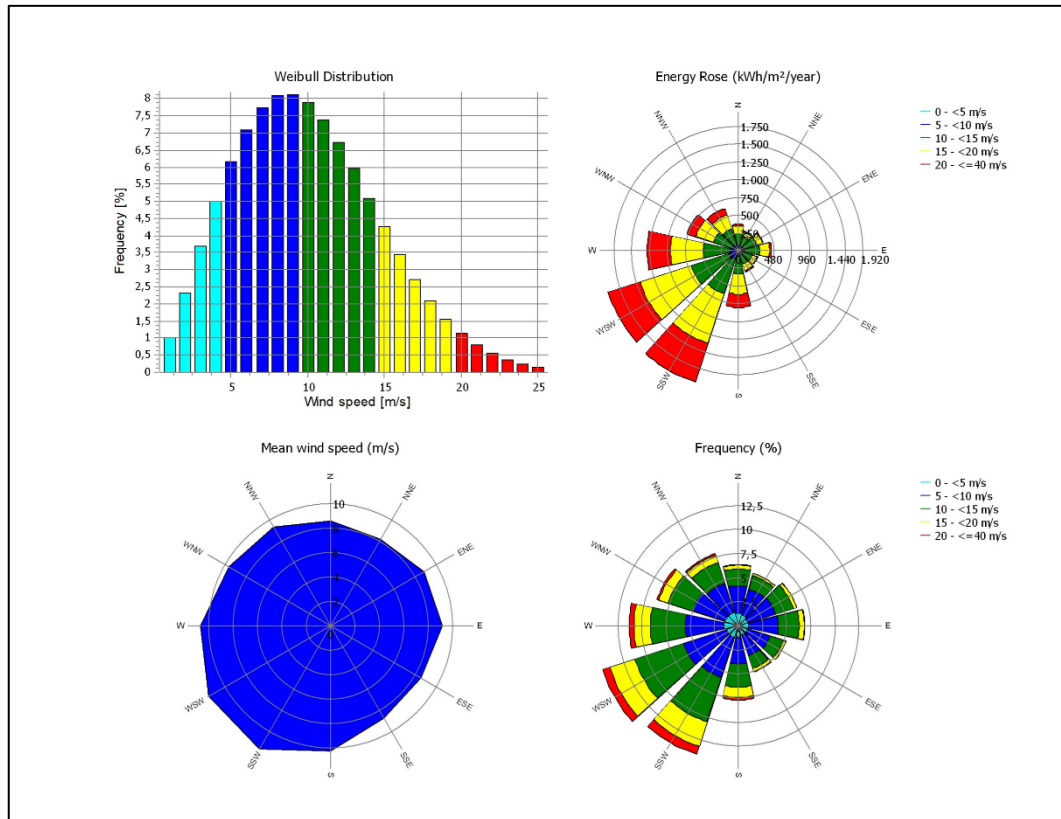
Parameter	Resultaat
Dominante windrichting	WZW - ZZW
Jaargemiddelde windsnelheid (lange-termijn) op 163m hoogte [m/s]	10,45
Weibull-schaalparameter op 163m hoogte (A)	11,79
Weibull-vormparameter op 163m hoogte (k)	2,260



Figuur 18: Grafische samenvatting van het windklimaat van Lageland op 163 meter

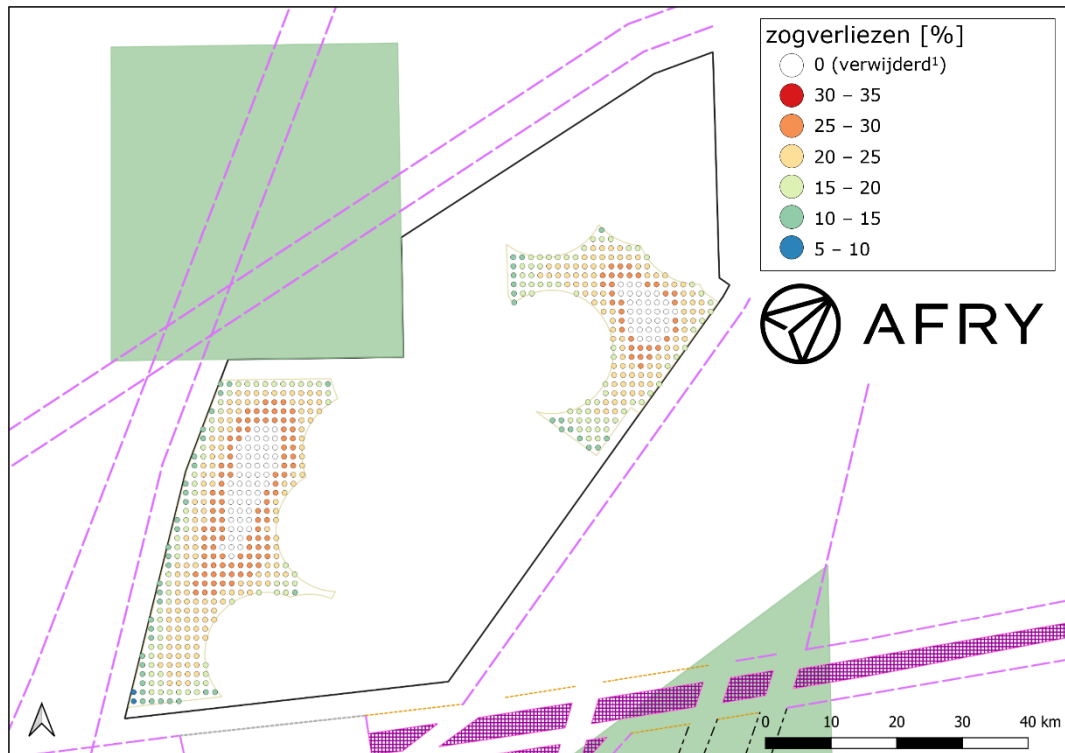
Tabel 16: Windparameters voor IJmuiden Ver Alpha en Beta

Parameter	Resultaat
Dominante windrichting	WZW - ZZW
Jaargemiddelde windsnelheid (lange-termijn) op 145m hoogte [m/s]	10,01
Weibull-schaalparameter op 145m hoogte (A)	11,30
Weibull-vormparameter op 145m hoogte (k)	2,217

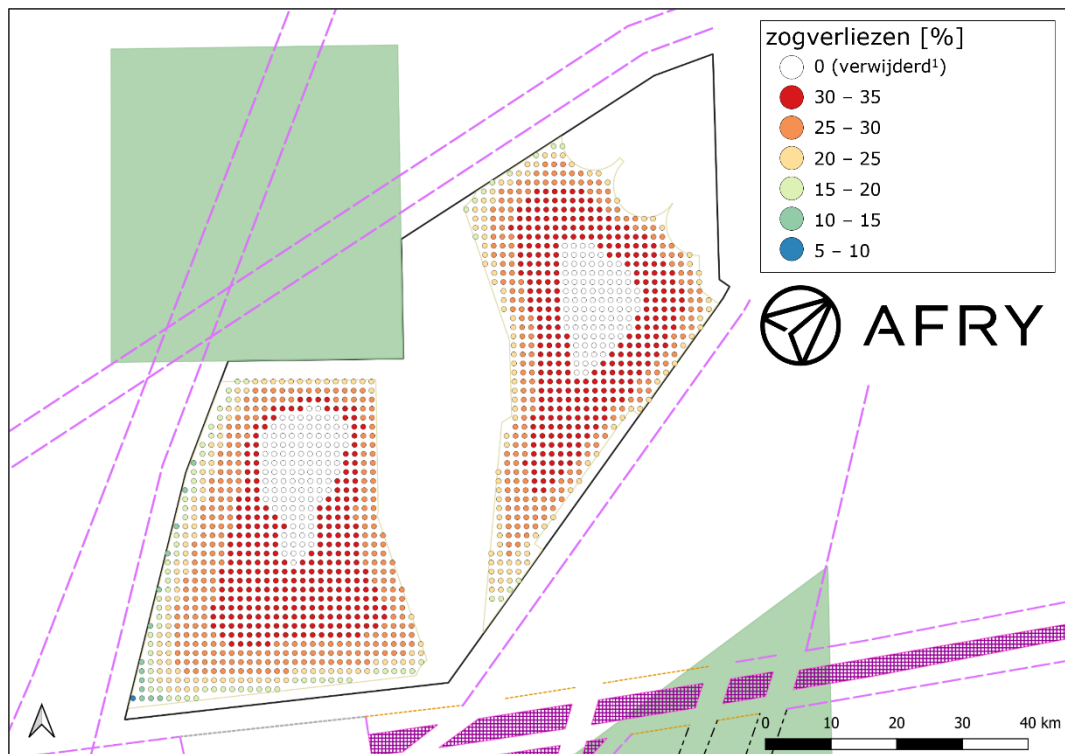


Figuur 19: Grafische samenvatting van het windklimaat van IJmuiden Ver Alpha en Beta op 145 meter

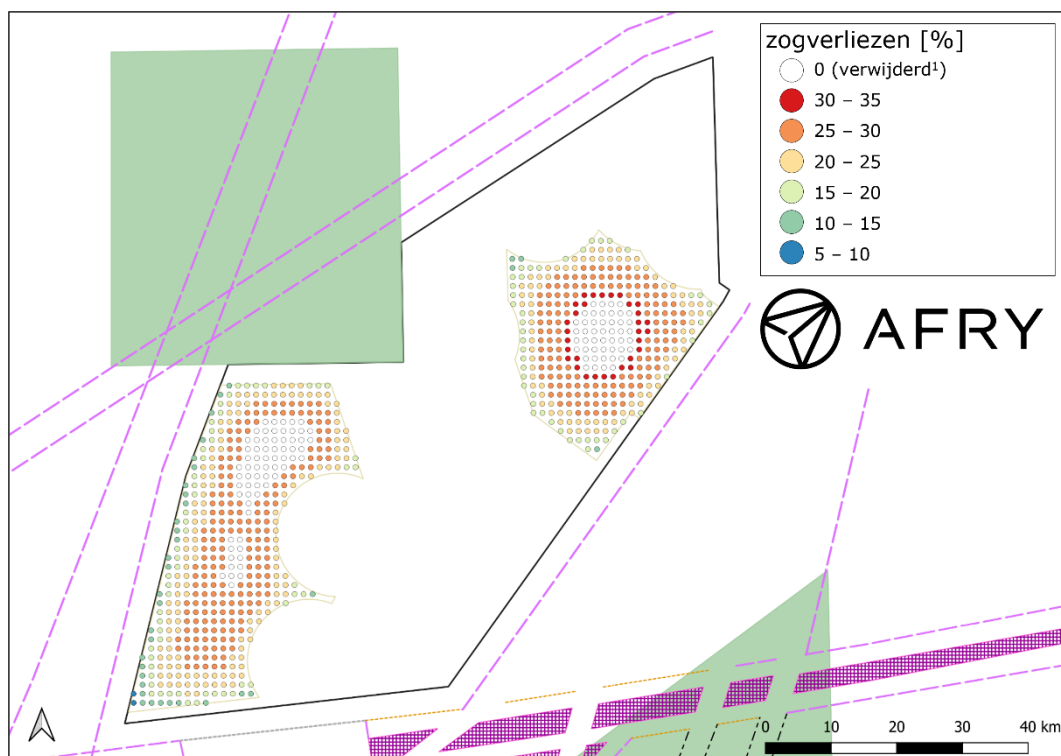
Bijlage B: zogverliezen



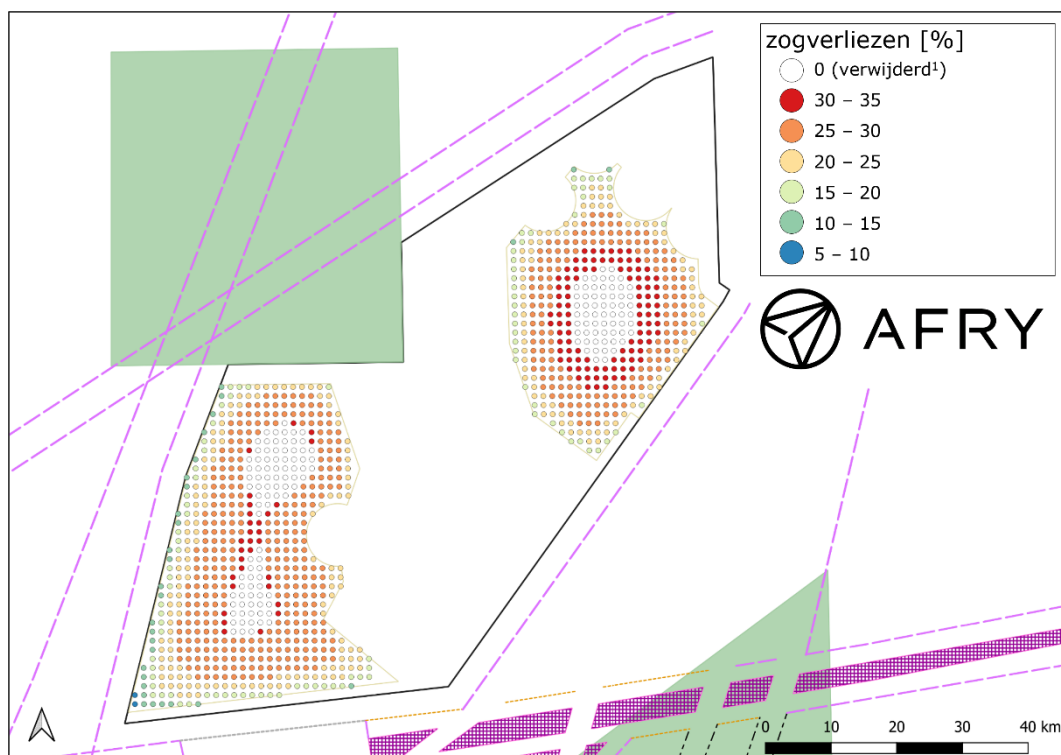
Figuur 20: #0 (Uiterste) turbine layout met zogverliezen (Eddy Viscosity)



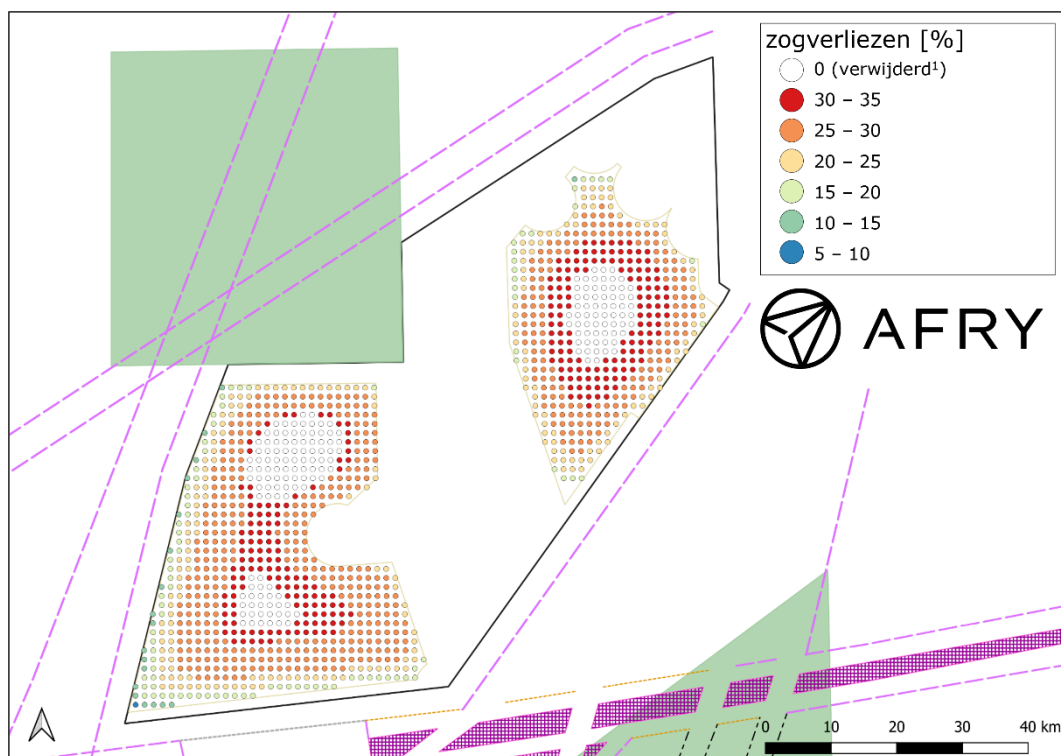
Figuur 21: #33 (Uiterste) turbine layout met zogverliezen (Eddy Viscosity)



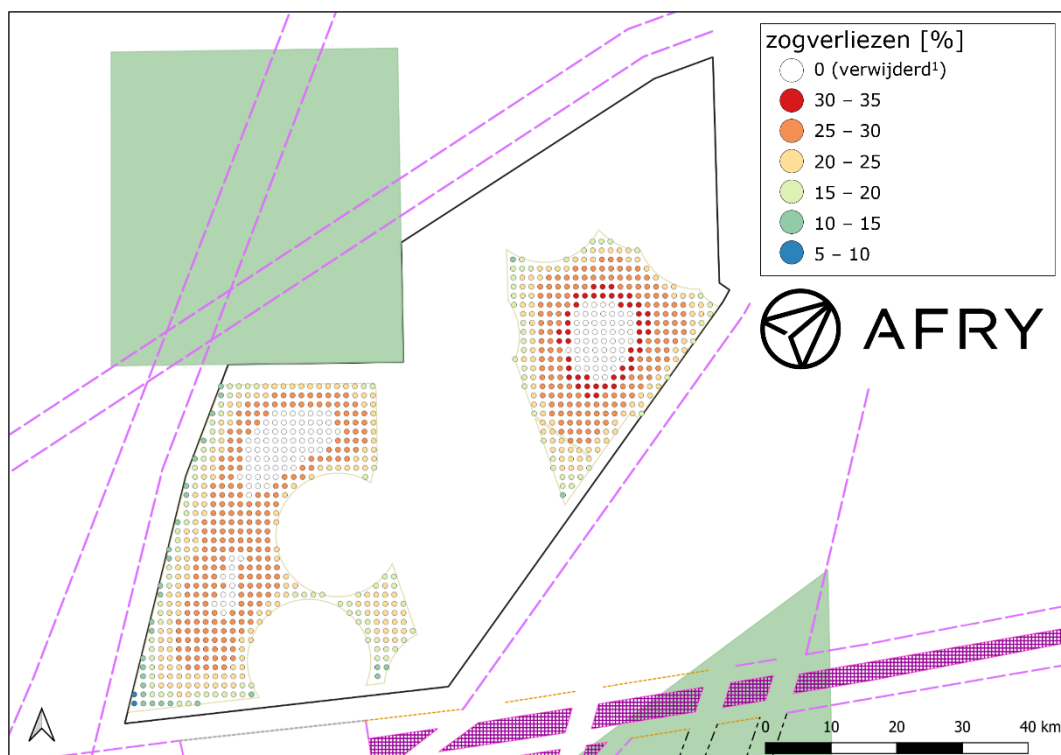
Figuur 22: #0-update turbinelayout met zogverliezen (Eddy Viscosity)



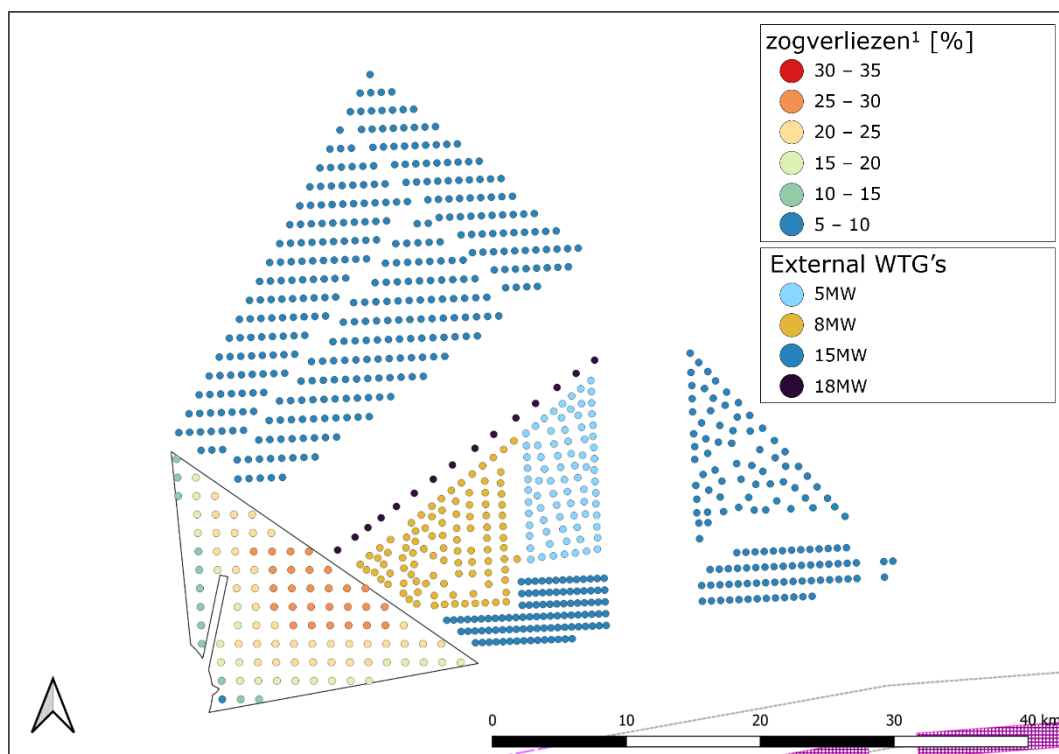
Figuur 23: #8 (Getrechterde variant) turbinelayout met zogverliezen (Eddy Viscosity)



Figuur 24: #1 (Getrechterde variant) turbinelayout met zogverliezen (Eddy Viscosity)

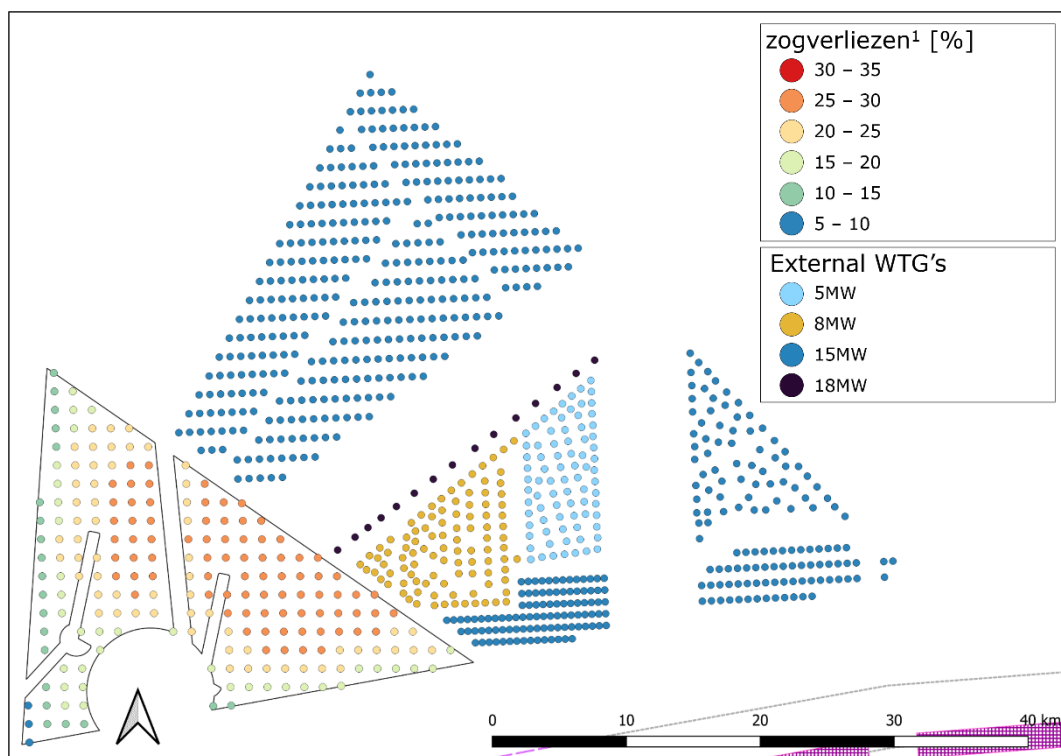


Figuur 25: #1-mijnbouw turbinelayout met zogverliezen (Eddy Viscosity)

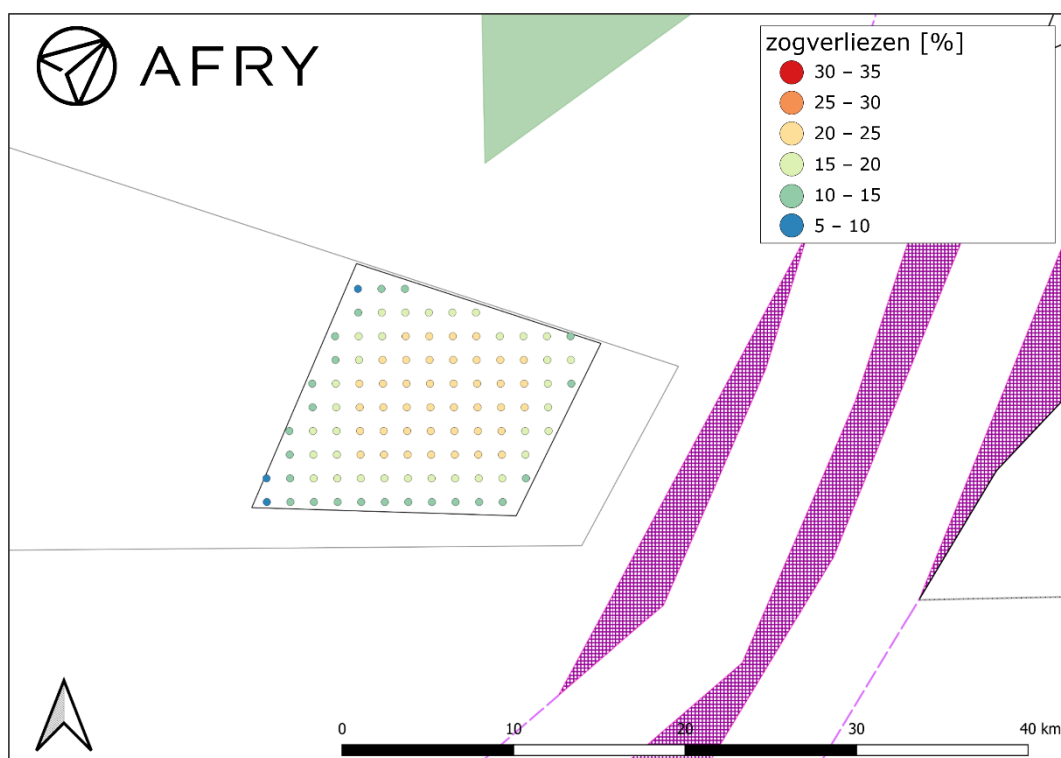


Figuur 26: Doordewind Referentie turbinelayout met externe zogverliezen¹¹ (Eddy Viscosity) en Duitse windturbines

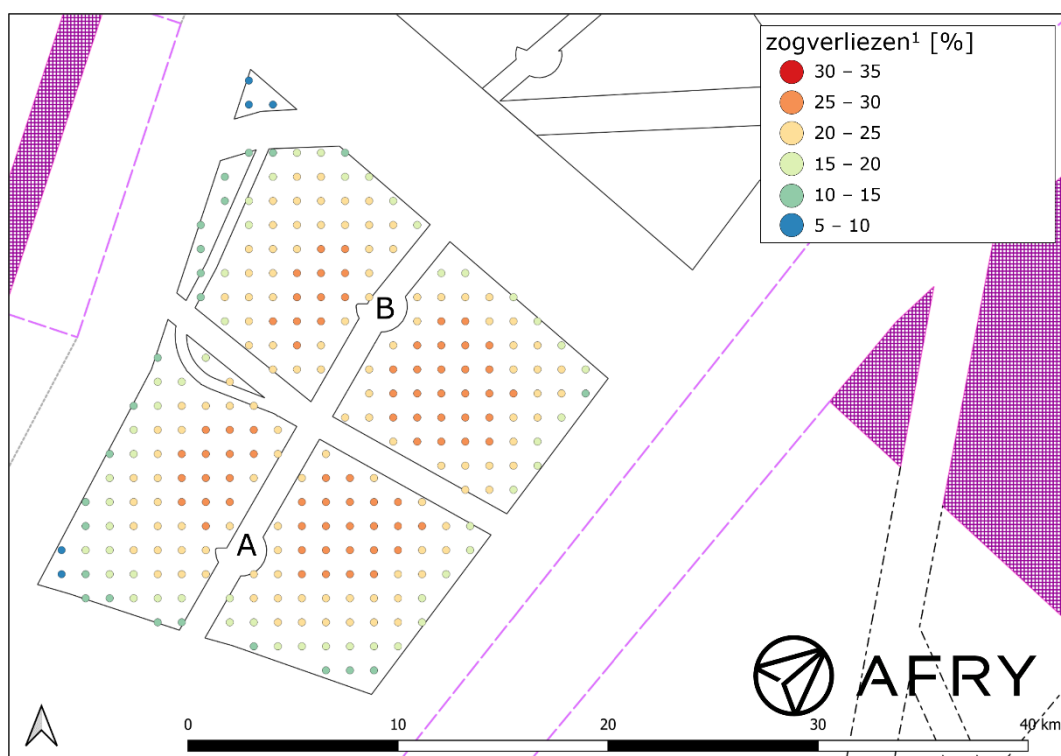
¹¹ Doordewind is berekent met externe zogverliezen van de Duitse windparken die verwacht worden voor 2031 ontwikkeld te zijn.



Figuur 27: Doordewind +2GW turbinelayout met externe zogverliezen (Eddy Viscosity) en Duitse windturbines

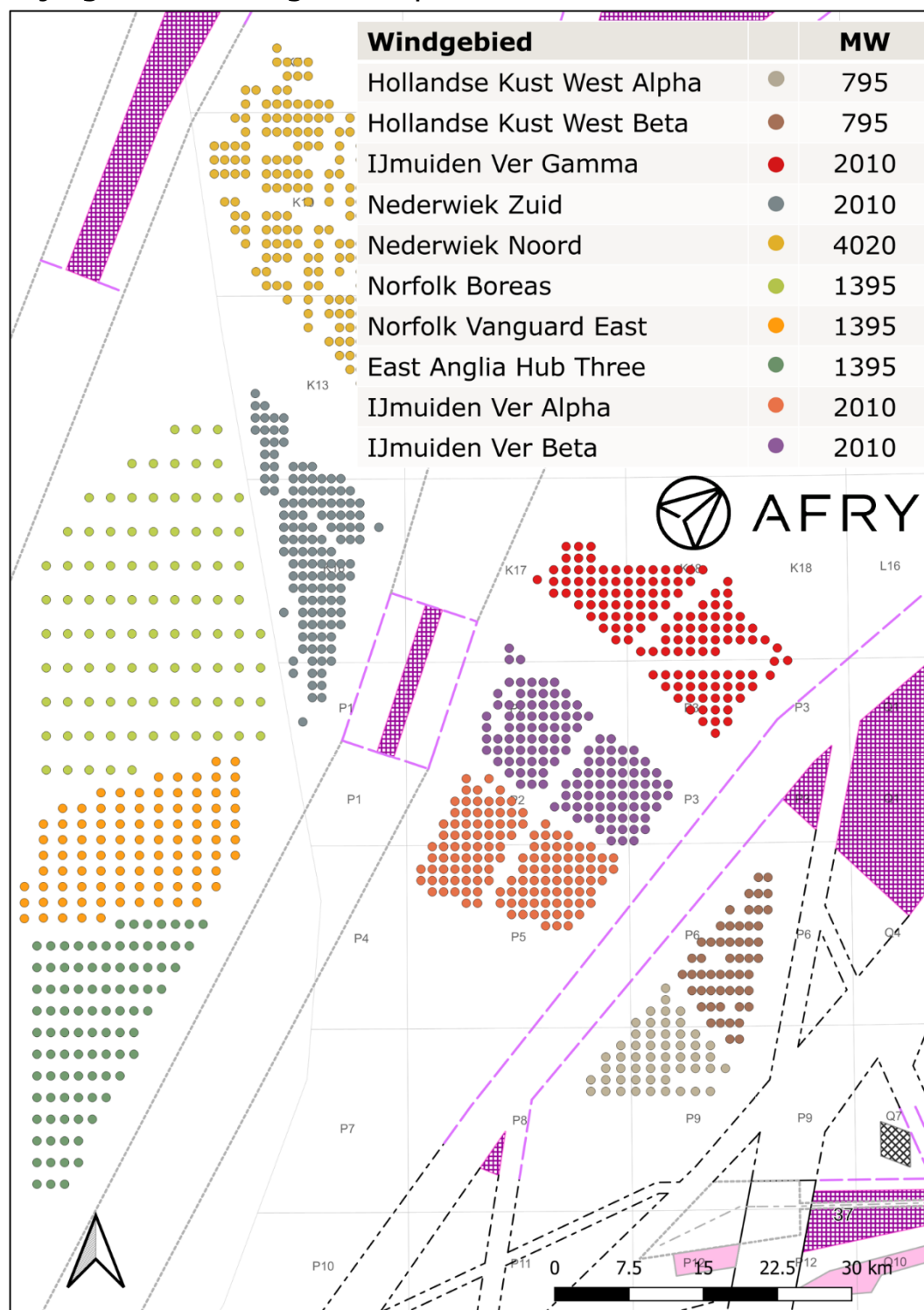


Figuur 28: Lageland turbine layout met interne zogverliezen (Eddy Viscosity)



Figuur 29: IJmuiden Ver Alpha en Beta turbine layout turbine layout met zogverliezen

Bijlage C: naburige windparken



Figuur 30: Overzicht van de naburige windparken die zijn meegenomen in de energieopbrengst berekeningen voor IJmuiden Ver referentievarianten

Tabel 17: Overzicht van de naburige windparken die zijn meegenomen in de energieopbrengst berekeningen voor Doordewind

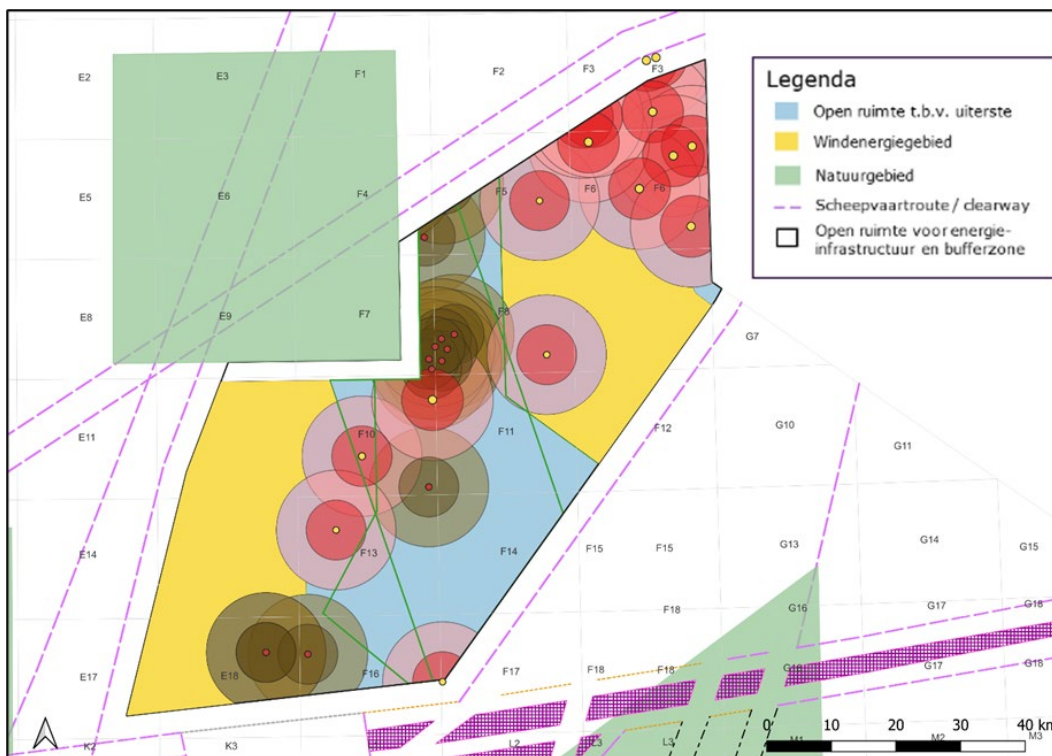
Windpark	MW	WTG capaciteit (MW)	# WTG
Veja Mate (DE36)	402	6	67
Deutsche Bucht (DE24)	536	8	67
BARD Offshore 1 (DE23)	400	5	80
EnBW He Dreiht (DE19)	960	15	64
Nordlicht I (DE2x)	1020	15	68
Nordlicht II (DE2v)	660	15	44
N-9.1 (DE3A)	2010	15	134
N-9.2 (DE3B)	2010	15	134
N-9.3 (DE3S)	1500	15	100
N-6.7 (DE2W) Waterkant	270	18	15

Tabel 18: Overzicht van de naburige windparken die zijn meegenomen in de energieopbrengst berekeningen voor IJmuiden Ver referentievarianten

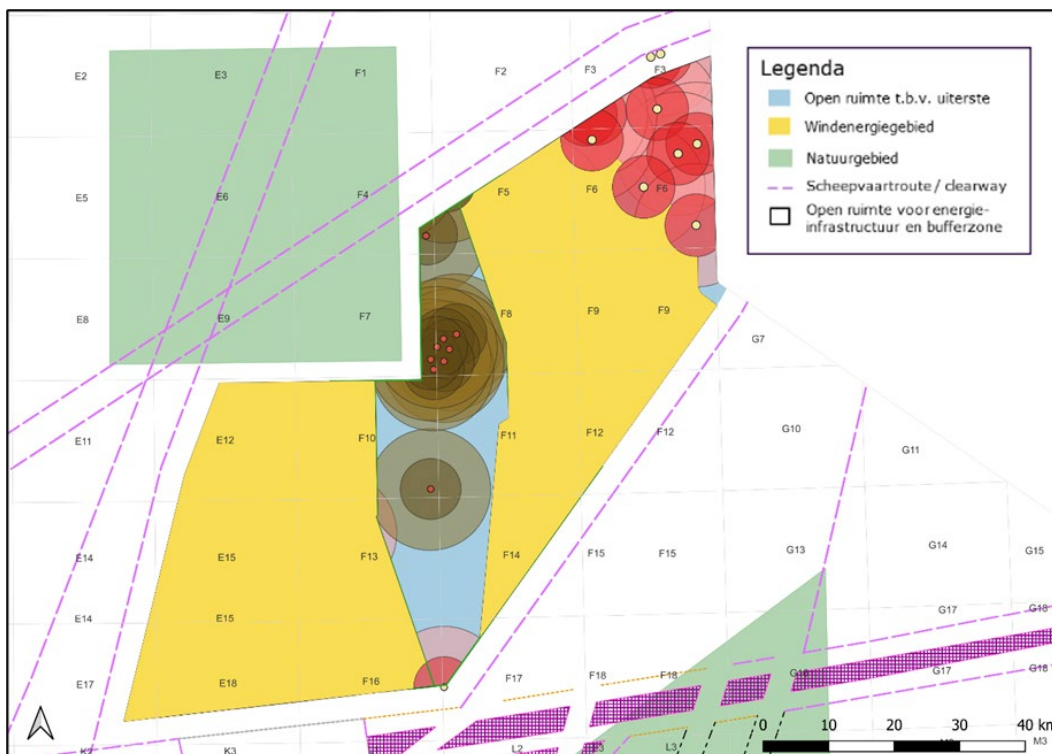
Windpark	MW	WTG capaciteit (MW)	# WTG
Hollandse Kust West Alpha	795	15	53
Hollandse Kust West Beta	795	15	53
IJmuiden Ver Gamma	2010	15	134
Nederwiek Zuid	2010	15	134
Nederwiek Noord	4020	15	268
Norfolk Boreas	1395	15	93
Norfolk Vanguard East	1395	15	93
East Anglia Hub Three	1395	15	93

Bijlage D: gebiedsindelingen voor energieopbrengstberekeningen

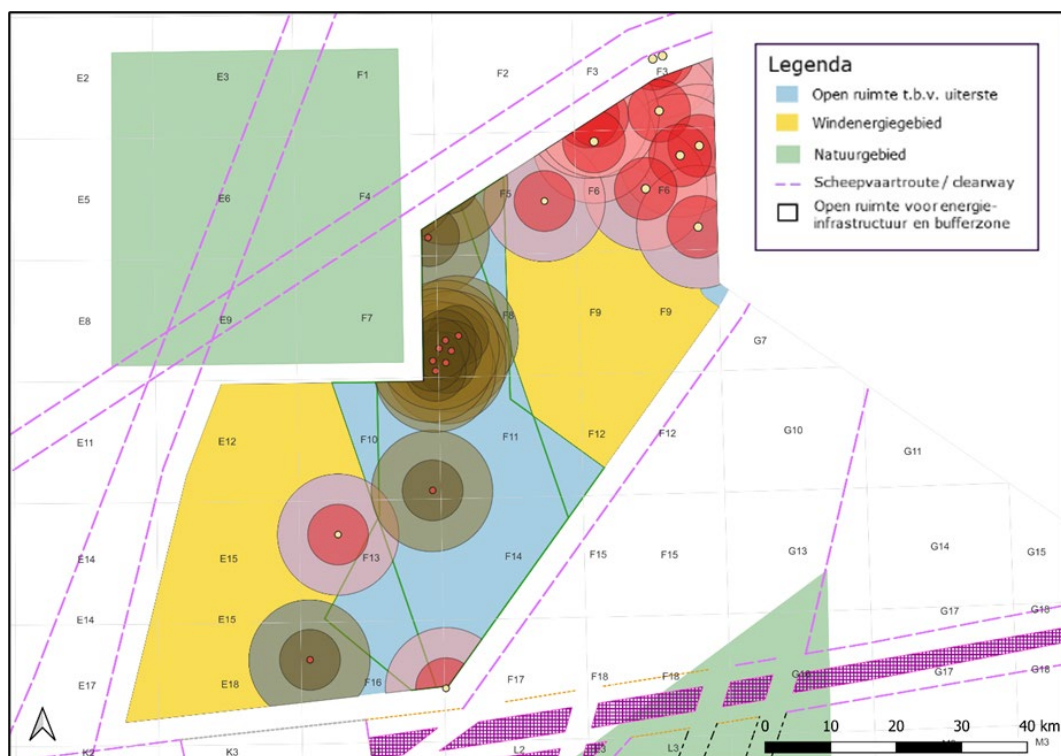
In deze bijlage worden de gebiedsindelingen groot weergegeven voor duidelijkheid.



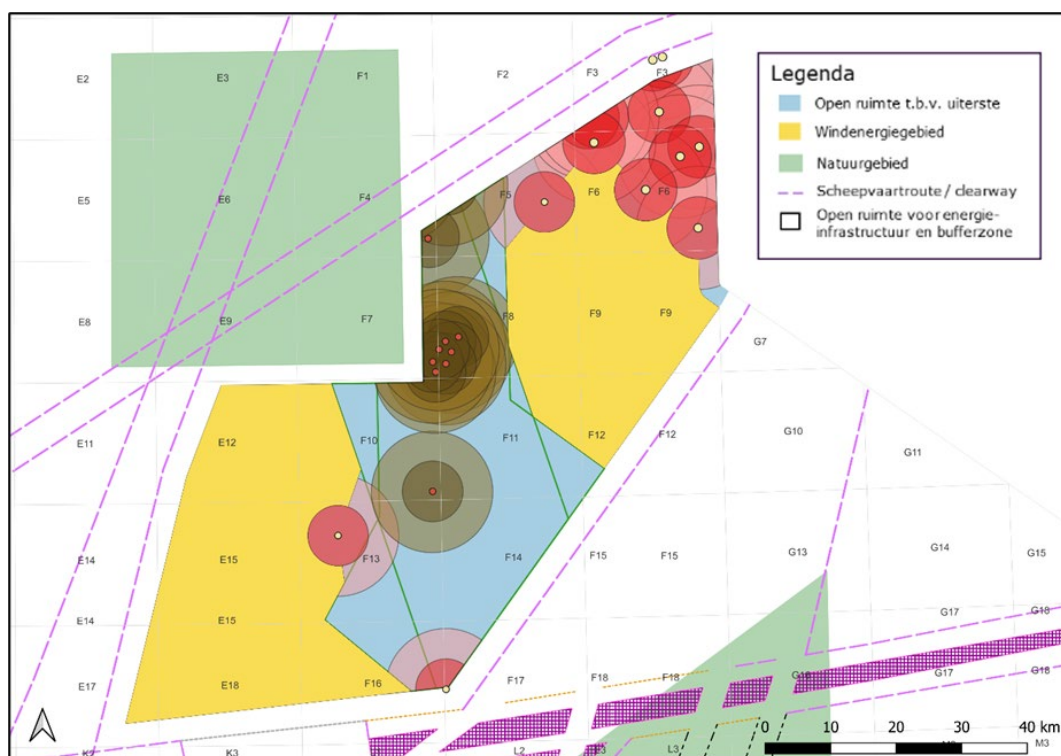
Figuur 31: Kaartbeeld #0 (Uiterste)



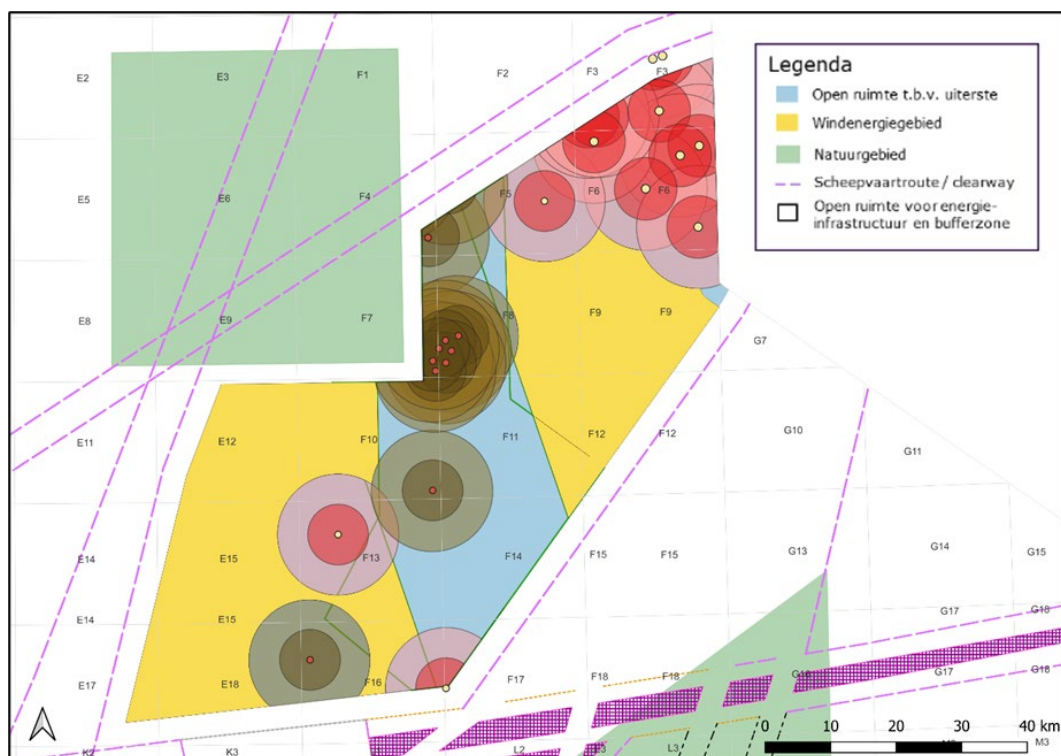
Figuur 32: Kaartbeeld #33 (Uiterste)



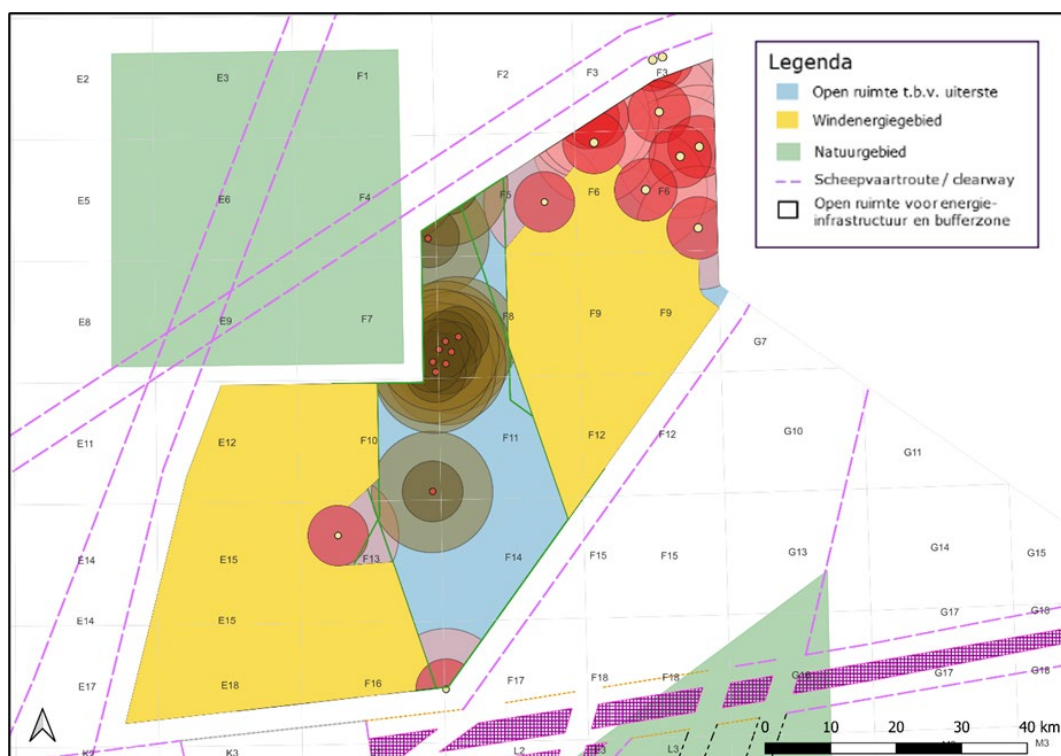
Figuur 33: Kaartbeeld #0-update



Figuur 34: Kaartbeeld #8 (Getrechterde variant)



Figuur 35: Kaartbeeld #1-mijnbouw



Figuur 36: Kaartbeeld #1 (Getrechterde variant)

Bijlage E: LCoE resultaten ten opzichte van IJmuiden Ver Alpha

In deze bijlage worden de LCoE resultaten besproken van zoekgebied 6/7, Doordewind en Lagelander ten opzichte van IJmuiden Ver Alpha (IJV A).

Zoekgebied 6/7

Varianten #1 (Getrechterde variant) en #33 (Uiterste), tonen een hogere netto LCoE van respectievelijk 1,3% en 3,5% ten opzichte van IJV A. Deze hogere LCoE wordt voornamelijk veroorzaakt door toenemende zogverliezen door het hoge vermogen van zoekgebied 6/7, namelijk 21,7GW en 26,6GW.

De resultaten laten zien dat het LCoE-verschil door hogere fundatiekosten bij alle zoekgebied 6/7-varianten ten opzichte van IJV A deels wordt gecompenseerd door een hogere bruto-energieopbrengst, besparingen op WTG-CAPEX en OPEX, en lagere kabelkosten en verliezen. Afhankelijk van het vermogen en de bijbehorende hoogte van de zogverliezen, resulteert dit in een hogere of lagere relatieve netto LCoE dan IJV A.

Varianten zoals #0 (Uiterste) en #0-update, met vermogens tot en met 16GW, tonen een lagere netto LCoE dan IJV A, namelijk -5,6% en -2,3% respectievelijk. Daarentegen laten varianten met een vermogen van meer dan 19GW, zoals #8 (Getrechterde variant), #1 (Getrechterde variant) en #33 (Uiterste), een vergelijkbare of hogere netto LCoE zien van respectievelijk -0,1%, 1,3% en 3,5%.

Bij IJV A is rekening gehouden met externe zogverliezen van naburige windparken die naar verwachting vóór 2031 worden gebouwd. Omdat naburige windparken in zoekgebied 6/7 pas na 2031 ontwikkeld worden, zijn deze externe zogverliezen niet meegenomen in de analyse. In werkelijkheid zullen hogere zogverliezen optreden als deze naburige windparken worden gerealiseerd, wat kan leiden tot hogere LCoE's, met name in de oostelijke kavels van zoekgebied 6/7.

De hogere fundatiekosten bij de varianten van zoekgebied 6/7 worden veroorzaakt door de grotere afmetingen en het hogere gewicht van de 20MW-turbines, samen met de grotere gemiddelde waterdiepte in vergelijking met IJV A. Binnen zoekgebied 6/7 is er een lichte variatie in fundatiekosten, waarbij de grotere waterdiepte in het midden van het gebied een bepalende factor is.

De kosten per megawatt voor de 15MW-turbines in IJV A en IJV B en de 20MW-turbines in zoekgebied 6/7 worden verondersteld vrijwel gelijk te blijven. Hoewel de installatiekosten per turbine hoger zijn voor de 20 MW-turbines, leidt het lagere aantal benodigde turbines tot lagere totale installatiekosten, wat resulteert in een lagere WTG-CAPEX.

Een vergelijkbare logica geldt voor de WTG-OPEX: hoewel deze per turbine hoger is bij de 20MW-turbines, zorgt het lagere aantal benodigde turbines per oppervlakte ervoor dat de totale WTG-OPEX lager uitvalt dan bij de kavels van IJV A en IJV B.

De kabelkosten hebben slechts een minimale invloed op de LCoE, met een verschil van -0,1%, wat vooral te verklaren is door het lagere aantal turbines per megawatt in de varianten van zoekgebied 6/7.

Doordewind

De Referentie-variant van Doordewind toont een netto LCoE-verschil van -7,7% ten opzichte van IJV A, voornamelijk gedreven door een significante daling in zogverliezen van -4,3%. Daarnaast wordt de bruto-energieopbrengst voor alle Doordewind-varianten verbeterd met -1,7%, wat te danken is aan een hogere gemiddelde windsnelheid van 10,5 m/s in vergelijking met 10,0 m/s bij IJV A. De +2GW-variant heeft een netto LCoE-verschil van -6,2%, met een daling in zogverliezen van -2,9%. De +4GW-variant laat een netto LCoE-verschil zien van -2,2%, waarbij de zogverliezen juist toenemen met +1,2 procentpunt. Dit illustreert hoe grotere vermogens gepaard gaan met toenemende zogverliezen, ondanks de gunstigere bruto-energieopbrengst door de hogere gemiddelde windsnelheid.

De funderingskosten zijn bij de Referentie-variant licht verhoogd met +0,4% door de grotere waterdiepte in het gebied. De +2GW-variant toont een vergelijkbare stijging in funderingskosten van +0,6%. Bij de +4GW-variant nemen de funderingskosten iets verder toe, met +0,7%, wat eveneens een gevolg is van de grotere waterdiepte in dit deel van Doordewind.

Lagelander

Lagelander heeft een netto LCoE-verschil van -11,2%, de grootste verlaging van alle varianten in de analyse. Deze aanzienlijke daling wordt voornamelijk gedreven door de uitzonderlijk lage zogverliezen en funderingskosten. Dit is te verklaren door de grotere afstand tot naburige windparken en de relatief lage waterdiepte in het gebied. De bruto-energieopbrengst voor Lagelander is echter licht verhoogd, wat een indicatie is van een minder optimaal windklimaat of lagere turbine-efficiëntie vergeleken met Doordewind.

De kabelkosten en andere verliezen zijn consistent laag bij zowel Doordewind als Lagelander, met een gezamenlijke invloed van -0,2% op de netto LCoE-verschil.