

Het potentieel van energie uit water in en rondom het Waddengebied



TNO 2023 P11784 – 9 januari 2024

Het potentieel van energie uit water in en rondom het Waddengebied

Auteurs	S. Lamboo, F.L. Taminiau, L.W.M. Beurskens
Rubricering rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	70 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Projectnaam	Expert review van het potentieel van energie uit water in en rondom het Waddengebied
Projectnummer	060.55066
Opdrachtgevers	Waddenfonds, Invest-NL, Provincie Fryslân, Provincie Groningen, De Ontwikkelingsmaatschappij Noord-Holland Noord, Gemeente Texel, Gemeente Hollandse Kroon en Gemeente Den Helder

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Samenvatting

Het Waddenfonds heeft de ambitie om de energievoorziening in het Waddengebied (Waddeneilanden, Friesland, Groningen en de kop van Noord-Holland) te verduurzamen. Dat is een grote opgave in het Waddengebied omdat vanwege het behoud van het open en wijde landschap als kernwaarde van het gebied, windenergie geen voorkeursoptie is. Een tekort aan ruimte op het elektriciteitsnet beperkt op de korte termijn ook verdere groei van zonne-energie in de regio. Het Waddenfonds heeft TNO daarom gevraagd om een validatie te geven van de rol die verschillende energie uit water (EuW) technieken kunnen spelen in het verduurzamen van de energievoorziening in het gebied.

Dit onderzoek bouwt voort op het TNO-rapport “*Stroom uit water*” uit 2020. In dit rapport is de technische werking en het potentieel van verschillende EuW-technieken in Nederland behandeld (Lamboog & van der Brink, 2021). In het huidige onderzoek zijn zes techniekontwikkelaars en het potentieel van hun technieken in het Waddengebied in meer detail behandeld: 3 golfenergie ontwikkelaars, 2 getijdenenergie ontwikkelaars en 1 ontwikkelaar op het gebied van het spanningsverschil tussen zoet en zout water. In de openbare versie van dit rapport zijn de namen van de ontwikkelaars geanonimiseerd.

Er is bij de zes ontwikkelaars middels vragenlijsten en interviews informatie opgehaald over de werking van de techniek, de opschaling van de techniek, de kosten, de mogelijke baten, de aanlanding en de ecologische inpassing. Deze informatie is vervolgens door TNO beoordeeld en verwerkt in dit rapport. Ook aanvullende informatie uit de literatuur is gebruikt. De ontwikkelaars hebben in meerdere stadia van het onderzoek input kunnen leveren, onder meer op het conceptrapport.

Verder is er gekeken naar de inpassing van de technieken. Hiervoor hebben de ontwikkelaars locaties binnen de Waddenzee en de Noordzeekustzone (tot 20 km uit de kust) aangegeven die in hun ogen kansrijk zijn voor toepassing van hun techniek. Wij hebben kritisch gekeken naar het aangegeven ruimtebeslag en huidige andere gebruiksfuncties in het Waddengebied (zoals scheepvaart, bodemstoffenwinning en militaire gebieden). Netbeheerder Liander en Rijkswaterstaat zijn geïnterviewd over hun ideeën over respectievelijk de energie-technische inpassing van EuW en vergunningverlening voor EuW-projecten in het Waddengebied. Er is in deze studie geen additioneel onderzoek gedaan naar de ecologische, waterbouwkundige of hydrologische effecten van de verschillende technieken op specifieke locaties in het Waddengebied. Deze effecten kunnen een grote invloed hebben op het praktisch haalbare potentieel van de technieken en dient daarom in vervolgonderzoek nader uitgezocht te worden (zie ook de aanbevelingen).

De twee verduurzamingsambities van het Waddenfonds voor het Waddengebied waarnaar is gekeken zijn:

1. Rond 2030 20% tot 40% van het elektriciteitsverbruik van huishoudens zelf te produceren in het Waddengebied – Groningen, Friesland en de kop van Noord-Holland.¹
2. De Waddeneilanden op jaarbasis geheel zelfvoorzienend in hun eigen elektriciteitsbehoefte in 2026.

¹ Texel, Den Helder, Schagen en Hollands Kroon.

Om de eerste ambitie te vervullen is er 560 - 1120 GWh/jaar elektriciteitsproductie in het Waddengebied nodig. Om de tweede ambitie te vervullen is er op de Waddeneilanden 170 - 180 GWh/jaar additionele elektriciteitsproductie nodig. Het verwachte elektriciteitsverbruik op de Waddeneilanden zelf is 145 GWh/jaar in 2026. Hier komt naar schatting nog 60 - 70 GWh aan vraag bij van het geëlektrificeerde NAM-platform bij Ameland. Momenteel wordt er naar schatting ongeveer 35 GWh aan zonne-energie opgewekt op de eilanden (op basis van geïnstalleerd vermogen zon-PV, CBS).

Op basis van de aangeleverde (technische) informatie van de ontwikkelaars op basis van een door TNO opgestelde vragenlijst en tijdens de interviews is een beeld gevormd van de werking van de technieken en de verwachtingen rondom de elektriciteitsproductie. De technieken bevinden zich in verschillende stadia van ontwikkeling, van ontwerp tot eerste demonstratieprojecten. Hierdoor is de elektriciteitsproductie grotendeels gebaseerd op verwachtingen en niet op praktijkmetingen.

De drie golfenergieontwikkelaars hebben verschillende ontwerpen en ook verschillende standaardformaten van de apparaten (zie [Tabel 1.1](#)). Een golfenergiepark bestaat uit meerdere apparaten. Het formaat van de apparaten beïnvloedt de elektriciteitsproductie bij gelijke golfcondities. Op basis van de aangeleverde informatie vinden we de verwachte elektriciteitsproductie per apparaat aannemelijk en in lijn met de literatuur. De drie golfenergieconverters zullen op eenzelfde locatie in het Waddengebied andere productieprofielen hebben. We hebben in dit onderzoek niet gekeken naar de golfcondities op de verschillende plekken in het Waddengebied en of een van de productieprofielen een voorkeur zou genieten boven de anderen. In algemene zin geldt dat de energie in de golven in de winter hoger is dan in de zomer en daardoor produceren de golfenergieconverters in de winter meer elektriciteit.

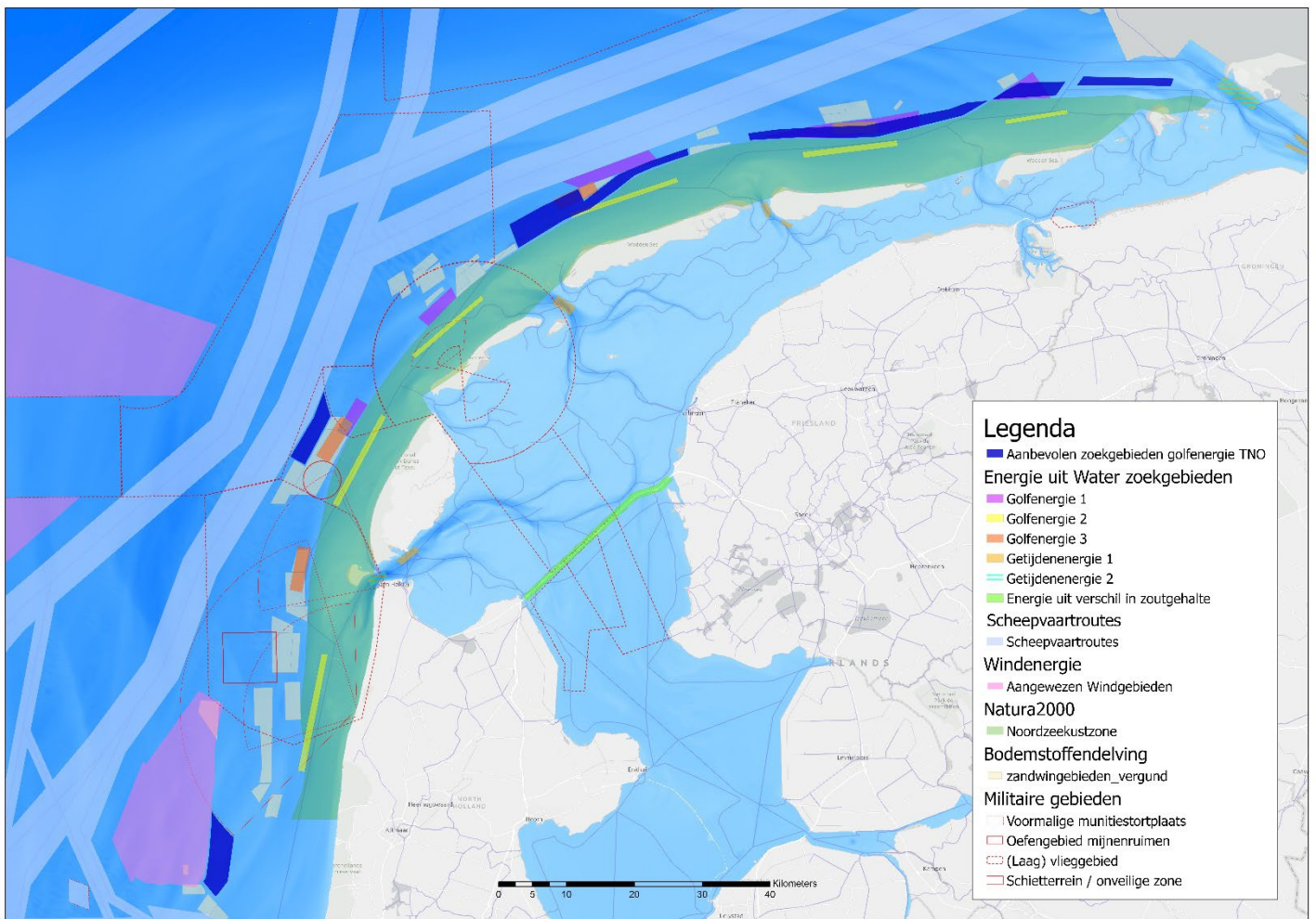
De door *Getijdenenergie 1* verwachte elektriciteitsproductie is in lijn met de literatuur en de SDE++ en vinden wij daardoor ook aannemelijk. Het productieprofiel is afhankelijk van de getijden die op hun beurt weer afhankelijk zijn van de beweging van de aarde en de maan. Hierdoor is de productie goed voorspelbaar. *Getijdenenergie 2* is in een vroeger stadium van ontwikkeling en de onzekerheid rondom de elektriciteitsproductie is daarom groter.

De ontwikkelaar van de techniek voor energie uit het verschil in zoutgehalte tussen twee waterlichamen beoogt een installatie met een piekvermogen van 100 MW voor commerciële productie te ontwikkelen. Deze kan ook bestaan uit meerdere kleinere installaties van bijvoorbeeld 10 MW. De verwachte jaarlijkse elektriciteitsproductie is gebaseerd op de volledige 100 MW. In vorige onderzoeken en in de literatuur is doorgaans uitgegaan van 8000 vollasturen per jaar. De verwachting van de ontwikkelaar is lager door 1) de beschikbaarheid van zoet water en 2) het zoutgehalte in de Waddenzee. Hierdoor produceert de installatie niet continu op vollast, maar op een verwacht gemiddelde van ongeveer 67 MW. We vinden deze inschatting van de ontwikkelaar aannemelijker dan oude aannames over continue productie, ook gezien het feit dat er voor een 100 MW installatie een groot deel van het zoete water dat afgevoerd wordt van het IJsselmeer naar de Waddenzee door de installatie zou moeten stromen.

Tabel 1.1: Overzicht verschillende beoogde vermogens en jaarlijkse productie van de vijf onderzochte apparaten en de beoogde installatie van de techniek voor energie het verschil in zoutgehalte. Commerciële golf- en getijdenprojecten zullen uit parken met meerdere apparaten bestaan.

Ontwikkelaar	Beoogd vermogen commerciële schaal apparaat/installatie	Beoogd jaarlijkse elektriciteitsproductie per apparaat	Vollasturen
Golfenergie 1	100 kW (4x25 kW)	300 MWh (4x75 MWh)	3000
<i>Golfenergie 2</i>	300 kW	300 MWh	1000
<i>Golfenergie 3</i>	100 kW	220 MWh	2200
<i>Getijdenenergie 1</i>	500 kW	1850 MWh	3700
<i>Getijdenenergie 2</i>	50 kW	88 MWh	1760
<i>Energie uit het verschil in zoutgehalte</i>	100 MW (meerdere installaties van 5 of 10 MW)	450000 MWh	4500

De ontwikkelaars hebben beoogde zoekgebieden aangegeven waar projecten gerealiseerd kunnen worden. Voor deze zoekgebieden hebben we ook gekeken naar ander gebruik van de gebieden. Een overzicht is gegeven in [Figuur 1.1](#). Er is voldoende fysieke ruimte voor de ambities van de ontwikkelaars, maar ander gebruik van de ruimte is een aandachtspunt. Het aandachtspunt voor getijdenenergie is met name dat de beoogde locaties ook vaarwegen zijn en er dus rekening gehouden moet worden met scheepsvaart. Voor golfenergie is het van belang aandacht te geven aan militaire oefenzones en zandwingebieden. Ook moet er goed nagedacht worden over de kabels die vanuit een golfenergiepark naar land lopen. Voor alle projecten geldt dat ecologische impact ook een aandachtspunt is, gezien alle projecten in of nabij Natura 2000 gebieden liggen.



Figuur 1.1: Zoekgebieden voor EuW in het Waddengebied. Aangeleverd door de ontwikkelaars en aangevuld door TNO.

Er is voldoende theoretisch en technisch potentieel in het Waddengebied voor de beoogde plannen van de ontwikkelaars richting 2030 (zie de ambities in [Tabel 1.2](#) en voor een groot deel van de realisatie van de doelen van het Waddenfonds. Voor golfenergie specifiek is er meer dan genoeg golfkracht in de zee aanwezig en zijn er ook genoeg locaties waar deze gewonnen zou kunnen worden. De potentie daarvoor na 2030 is voor het realiseren van installaties groter dan de beoogde plannen van de ontwikkelaars tot 2030. Voor getijdenenergie is de totale winbare kracht in water kleiner en zit *Getijdenenergie 1* met een beoogde 40 MW dicht bij het maximale potentieel in de Waddenzee. Voor energie uit het verschil in zoutgehalte is er voldoende zoet water afvoer voor een 100 MW installatie, maar op sommige momenten in het jaar zal droogte de capaciteit tijdelijk verlagen. In zeer droge perioden komt het voor dat vrijwel al het zoete water van het IJsselmeer naar de Waddenzee door de 100 MW installatie zou moeten stromen, waardoor dit ook de bovenkant is van het realiseerbare potentieel.

Tabel 1.2: Overzicht totaal geïnstalleerd vermogen en jaarlijkse elektriciteitsproductie in 2030 per techniek volgens de ambities van de ontwikkelaars.

Partij	Beoogd geïnstalleerd vermogen 2030 door ontwikkelaar (MW)	Verwachte productie 2030 (GWh/jaar)	Aantal benodigde apparaten
<i>Golfenergie 1</i>	5 - 30	15 - 90	50 - 300
<i>Golfenergie 2</i>	100	100	33
<i>Golfenergie 3</i>	50	110	500
<i>Getijdenenergie 1</i>	40	150	80
<i>Getijdenenergie 2</i>	5	12,4	100
<i>Energie uit verschil in zoutgehalte</i>	100	450	1 of meer
Totaal	300 - 325	847,4 - 912,4	
Ambitie 1: Aandeel van elektriciteitsverbruik huishoudens in het Waddengebied in 2030		31-34%	
Ambitie 2: Aandeel van elektriciteitsverbruik Waddeneilanden in 2030		>100%	

Er is momenteel nagenoeg geen ruimte op het elektriciteitsnet door congestieproblematiek. Naar verwachting komt er de komende jaren meer ruimte vrij voor additionele stroomproductie in het gebied. De goede tot uitstekende voorspelbaarheid van de elektriciteitsopbrengst uit EuW gedurende het jaar en gedurende de dag is een pluspunt voor de inpassing voor de netbeheerder, maar die mag dit bij de huidige regelgeving nog niet meenemen in de prioritering van projecten. Er zijn daarom regeltechnische en juridische wijzigingen nodig die de netbeheerders meer ruimte geven om andere factoren mee te nemen in de afwegingen voor de volgorde waarin projecten aangesloten worden om meer ruimte te bieden aan EuW-projecten. Mocht deze ruimte er in de komende jaren komen dan verwachten we dat de hoeveelheid golf- en getijdenenergie die uitgerold kan worden beperkt wordt door de elektriciteitsvraag op de Waddeneilanden, de mogelijkheden om elektriciteit vanaf de Waddeneilanden te kunnen leveren aan het vasteland en de productie van zonne-energie op de Waddeneilanden (momenteel ingeschat op 35 GWh/jaar hetgeen overeenkomt met het huidige verbruik van alle woningen op de eilanden). Zonder toename van de productie van zonne-energie komt het maximale potentieel voor EuW op de Waddeneilanden uit op maximaal 83% van de elektriciteitsvraag op de Waddeneilanden in 2030 (Tabel 1.3). Hierin is nog geen rekening gehouden met doorlooptijden van opschaling en vergunningverlening. Ook is er nog geen rekening gehouden met een mogelijke gedeeltelijke invulling van de vraag door andere technieken, zoals zon PV. Het betreft dus een theoretisch maximum voor de EuW-technieken die lager ligt dan de gezamenlijke ambities van de ontwikkelaars.

Vergunningverlening voor aanvragen van EuW-projecten kan snel gaan, maar voorbereidingen kunnen veel tijd in beslag nemen. Bij grote projecten duurt een geheel traject vanaf het indienen van een complete vergunningsaanvraag ongeveer een half jaar, mits de aanvrager gedegen vooronderzoek heeft gedaan. Een dergelijk voortraject kan enkele jaren duren.

Voor de EuW-technieken is het met name belangrijk dat er door een onafhankelijk en daartoe bevoegde organisatie onderzoek gedaan is naar de betrouwbaarheid van de

installatie en er aangetoond is dat de kans nagenoeg uitgesloten is dat de installatie door de kracht van het water van zijn plaats geslagen wordt.

Alle zoekgebieden liggen in of nabij Natura 2000 gebieden, wat de ecologische effecten van cruciaal belang maakt. Voor alle technieken loopt er onderzoek naar de ecologische effecten of is er al onderzoek gedaan naar deze effecten². Op basis van deze studies valt te verwachten dat het mogelijk is om projecten te ontwikkelen die geen significant negatieve effecten hebben op de ecologie. Beoordeling van de specifieke ecologische effecten op het productiepotentieel in de verschillende zoekgebieden is echter niet gedaan in deze studie. Hierdoor blijft het onzeker of er nog beperkingen zijn op de mogelijkheden voor realisatie van projecten binnen deze zoekgebieden.

Gezien de huidige ontwikkeling van de installaties, de netbeperkingen en lange voortrajecten voor vergunningverlening achten we de kans klein dat de technieken al voor 2030 commercieel uitgerold worden zoals een aantal van de ontwikkelaars beoogt. Alle golf- en getijdenontwikkelaars moeten nog meerdere opschalingsstappen zetten naar commerciële productie. Sommigen moeten nog een eerste pilotproject op zee op volledige schaal toetsen. Anderen zijn toe aan een eerste project met meerdere arrays aan apparaten. Het exacte tempo van deze opschaling is lastig in te schatten. Zonder verdere ondersteuning verwachten we dat het verloop van deze opschaling meer tijd in beslag neemt dan waar sommige ontwikkelaars momenteel van uitgaan. Gezien de beperkingen rondom nieuwe aansluitingen op het elektriciteitsnet en de potentieel lange voortrajecten voor vergunningsverlening achten wij de kans klein dat de ontwikkelaars enkele honderden apparaten uitgerold hebben op commerciële schaal voor 2030.

Voor de techniek voor energie uit het verschil in zoutgehalte tussen twee waterlichamen verwachten we dat er voor 2030 maximaal nog één stap nodig is voor een eerste MW-schaal installatie (1-10 MW). De komende jaren zal de ontwikkelaar bezig zijn met het realiseren van een 16,5 kW demonstratie waar recentelijk subsidie voor is verkregen van het Waddenfonds. Een sprong van kW schaal naar een installatie van 100 MW is mogelijk, maar lijkt ons minder realistisch dan opschaling in twee stappen met nog een 1-10 MW schaal project voor de opschaling naar 100 MW.

Nemen we de huidige status van de opschaling van technieken, de beperkte netcapaciteit en de doorlooptijd voor het verkrijgen van vergunningen samen dan concluderen we dat het onwaarschijnlijk is dat er in 2026 al grote projecten gerealiseerd kunnen zijn. We verwachten dat in 2026 maximaal een paar (kleinschalige) pilot- of demonstratieprojecten gerealiseerd zijn met slechts een beperkte elektriciteitsproductie.

De kans dat de EuW-technieken in 2030 bij kunnen dragen aan de verduurzamingsambities van het Waddengebied achten we groter. Hoe groot deze bijdrage in 2030 zal zijn is niet goed in te schatten. De bijdrage van de EuW-technieken hangt met name af van het tempo van opschaling van de technieken, het tempo van vergunningverlening en de beschikbare netcapaciteit. Ook hangt het af van de ontwikkeling van het aandeel zonne-energie op de Waddeneilanden. Alles moet dus meezitten om deze 226 GWh/jaar mogelijk te maken. In [Tabel 1.3](#) staat een inschatting van wat we denken dat er maximaal mogelijk is in 2030 als alles meezit voor de EuW technieken.

De huidige kosten van de EuW-technieken zijn relatief hoog vergeleken met andere hernieuwbare vormen van elektriciteitsproductie en door beperkte informatie lastig in te schatten. Voor een daling in kosten is opschalen van belang. Op de korte termijn is er (financiële)

² Bijvoorbeeld door Deltares, NIOZ en Buro Bakker.

ondersteuning nodig voor opschaling. Hoe rendabel EuW-technieken worden (ten opzichte van andere hernieuwbare elektriciteitsproductie en onderling vergeleken met de andere EuW-technieken) is naast kosten afhankelijk van wat de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit zijn.

EuW-technieken kunnen eventuele ecosysteemdiensten leveren en aanvullende maatschappelijke baten geven, zoals de lokale productie van elektriciteit, minder zichtbaarheid in vergelijking met zonne- en windenergie, het creëren van ecosystemen rond ankers, alternatieve energiebronnen voor netbeheerders en golfdemping. Het kwantificeren van deze diensten en baten zal belangrijk zijn om de ontwikkeling te versnellen. Hoewel al deze diensten en baten kwalitatief of in eerste tests aangetoond zijn is er een bredere wetenschappelijke onderbouwing nodig voordat gesteld mag worden dat EuW een aanzienlijk voordeel levert op deze vlakken.

Tabel 1.3: Inschatting van het maximale dat de EuW-technieken in 2030 bij kunnen dragen onder voorwaarde dat er voldoende netcapaciteit is, de vergunningverlening op tijd is afgerond, de techniek tot commerciële schaal opgeschaald is, geen significante ecologische beperkingen zijn, er geen verdere opschaling is van zonne-energie op de eilanden en er voldoende energieopslag is om vraag en aanbod op de Waddeneilanden te balanceren. Na 2030 neemt het maximale potentieel naar verwachting toe door verdere elektrificatie van de energievraag op de Waddeneilanden.

Techniek	Maximum in 2030 volgens TNO (GWh/jaar)	Maximum in 2030 volgens TNO (MW)
Golfenergie	181 ¹	60 – 180 ²
Getijdenenergie		30 ³
Energie uit het verschil in zoutgehalte	45	10 ⁴
Totaal	226	70 – 190⁵
Ambitie 1: Aandeel van elektriciteitsverbruik huishoudens in het Waddengebied (2030)	8%	
Ambitie 2: Aandeel van elektriciteitsverbruik Waddeneilanden (2030)	>100% inclusief energie uit verschil in zoutgehalte 83% exclusief energie uit verschil in zoutgehalte	

- ¹ Dit theoretisch maximum is ingeschat op basis van de elektriciteitsvraag op de Waddeneilanden in 2030 en geldt voor het totaal van de golf- en getijdentechnieken.
- ² De drie golfontwikkelaars kunnen in 2030 samen maximaal 181 GWh winnen (als er geen getijdenenergie ontwikkeld wordt). Op basis van de verschillende ontwerpen is dit 60 – 180 MW, afhankelijk van de vollasturen per apparaat.
- ³ De twee getijdenontwikkelaars kunnen in 2030 samen maximaal 30 MW winnen. De verdeling tussen de ontwikkelaars hangt af van hun ontwikkelpaden.
- ⁴ Het is onze inschatting dat de ontwikkelaar voor energie uit het verschil in zoutgehalte in 2030 maximaal een eerste MW schaal installatie (1-10 MW) kan realiseren.
- ⁵ Ondergrens is alleen *Golfenergie 1* (60 MW met 3000 vollasturen) en energie uit het verschil in zoutgehalte. Bovengrens is *Golfenergie 2* (180 MW met 1000 vollasturen) en energie uit het verschil in zoutgehalte. Als *Getijdenenergie 1* 30 MW realiseert wordt de bandbreedte 80-170 MW doordat er op sommige eilanden dan niet meer voldoende vraag is voor het complete potentieel aan golfenergie.

Op basis van het onderzoek komen we tot de volgende aanbevelingen:

- 1. Heroverweeg het doel voor zelfvoorzienende Waddeneilanden en bepaal de optimale mix aan technieken door middel van systeemstudies.**
Complete zelfvoorziening is een uitdaging, zeker als er bepaalde technieken (zoals windenergie en zonneweides) niet ingezet (kunnen) worden. Het doel legt een grote druk op de Waddeneilanden met veel benodigde eigen opwek, opslag en voldoende netcapaciteit. De benodigde opwek, opslag en netcapaciteit op de eilanden kan sterk afnemen als er gebruik gemaakt wordt van de bestaande elektriciteitskabels naar het vasteland. Een doel voor bijvoorbeeld 70-90% zelfvoorziening is ook ambitieus maar laat meer ruimte voor optimalisatie van de energiemix. De EuW-technieken kunnen ook bijdragen aan het behalen van zo'n ambitie. Systeemstudies kunnen inzicht bieden in de impact van verschillende opties.
- 2. Ondersteun vanuit het Waddenfonds op de korte termijn de verdere opschaling van de EuW-technieken.**
De EuW-technieken bevinden zich momenteel in een fase van ontwikkeling, pilot- en demonstratieprojecten. Om de EuW-technieken een bijdrage te laten leveren aan de Waddenfondsdoelen is opschaling van technieken essentieel. Er kan gekozen worden om meerdere technieken te ondersteunen om de kans te vergroten dat er in 2030 technieken commercieel beschikbaar zijn. Er kan ook ingezet worden op een beperkt aantal technieken als het Waddenfonds een grotere kans van succesvolle opschaling ziet bij deze technieken.
- 3. Bekijk voor de geïdentificeerde zoekgebieden voor getijden- en golfenergie ook naar de verwachte productie op de locaties.**
De specifieke stromings- en golfcondities zijn niet per zoekgebied onderzocht in dit onderzoek, maar bepalen wel de productie van een apparaat op een locatie. Door dit in vervolgonderzoek mee te nemen ontstaat een beter beeld van het potentieel en de verwachte elektriciteitsproductie. Het kan ook helpen met de keuze maken tussen verschillende technieken.
- 4. Kies zoekgebieden voor EuW op locaties waar zo min mogelijk andere belangen een ruimteclaim hebben en waar grotere projecten gerealiseerd kunnen worden.**
Dit kan het realiseren van de eerste golf- of getijdenparken vergemakkelijken en versnellen.
- 5. Doe een review van de ecologische effecten voor de zoekgebieden.**
Hiermee kunnen projecten gericht ontwikkeld worden in gebieden waar minder knelpunten met natuurwaarden worden verwacht. Zo kan eventuele vertraging in projectontwikkeling voorkomen worden.
- 6. Werk samen aan het ontwikkelen van standaarden voor de toetsing van robuustheid van technieken om vergunningverlening te versnellen. Laat robuustheid extern toetsen door een gecertificeerd bureau.**
Een toetsing van de robuustheid van technieken is een belangrijk punt voor de vergunningverlening. Door dit bij een externe partij te beleggen kan onafhankelijkheid gewaarborgd worden, wat het vertrouwen van vergunningverlener en financiers zal bevorderen.
- 7. Kijk in vervolgstudies naar potentieel op langere termijn (2035+).**
De mogelijkheden voor EuW zijn groter op de langere termijn.

8. Versnel het proces om winnende concepten te selecteren om cumulatieve investeringen beperkt te houden.

Op de korte termijn kan het een goede strategie zijn om in te zetten op meerdere technieken. Dan komen er vanzelf winnende concepten bovendrijven. Meerdere technieken ontwikkelen is echter meer financiering voor nodig. Door sneller naar winnende concepten te werken kan de hoeveelheid benodigde financiering beperkt worden.

9. Kijk voor golfenergie ook naar gebieden ver op zee.

Het potentieel voor golfenergie is verder op zee groter en er is vergunning technisch en qua ecologie minder complexiteit te verwachten dan nabij de natuurgebieden rondom het Waddengebied.

10. Bespreek EuW-plannen met de netbeheerders zodat er voor de ontwikkeling van netcapaciteit op de middellange en lange termijn rekening gehouden kan worden met de ontwikkeling van EuW-technieken, ook al is het lastig om in te schatten hoeveel er geïnstalleerd gaat worden.

Zo kan er beter geanticipeerd worden op de ingroei van de EuW-technieken en voorkomen worden dat er na netuitbreidingen onvoldoende ruimte over is op het elektriciteitsnet voor de EuW-technieken.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	12
1 Inleiding	13
1.1 Aanleiding en onderzoeksvragen.....	13
1.2 Aanpak onderzoek.....	13
1.3 Leeswijzer	14
2 Elektriciteitsverbruik in het Waddengebied.....	15
3 Technologische review	20
3.1 Golfenergie.....	20
3.2 Getijdenenergie.....	27
3.3 Energie uit verschil in zoutgehalte van twee waterlichamen	32
4 Technische inpassing.....	35
4.1 Potentieel van technieken	35
4.2 Vergunningen, netinpassing en ecologie	37
4.3 Zoekgebieden	41
5 Conclusies en aanbevelingen	52
5.1 Conclusies.....	52
5.2 Aanbevelingen.....	58
Referenties	62
Bijlagen	
Bijlage A: Data per gemeente in het Waddengebied	65
Bijlage B: Vragenlijst	68

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en onderzoeksvragen

Het Waddengebied wil verduurzamen. Ten eerste is er de ambitie van het Waddenfonds om in het gehele Waddengebied – Groningen, Friesland en de kop van Noord-Holland - 20 tot 40% van het elektriciteitsverbruik van huishoudens zelf te produceren rond 2030. Ten tweede ambiëren de Waddeneilanden om op jaarbasis geheel zelfvoorzienend zijn in hun eigen elektriciteitsbehoefte in 2026. Vanwege de wens op het behoud van het open en wijdse landschap wordt ontwikkeling van meer windenergie gezien als ongewenst in grote delen van het gebied. Om haar twee ambities mogelijk te maken en tegelijkertijd de unieke leefomgeving van het Waddengebied te beschermen heeft het Waddenfonds besloten om de ontwikkeling van technologieën op het gebied van Energie uit Water (EuW) te subsidiëren.

Meerdere bedrijven zijn bezig met de ontwikkeling van EuW. Voor het krijgen van een overzicht van de mogelijkheden heeft het Waddenfonds aan TNO gevraagd om een expert review en een inhoudelijke analyse uit te voeren voor de technieken van volgende EuW-ontwikkelaars:

1. 3 ontwikkelaars op het gebied van golfenergie
2. 2 ontwikkelaars op het gebied van getijdenenergie
3. 1 ontwikkelaar op het gebied van het spanningsverschil tussen zoet en zout water (ook wel ‘blauwe energie’ genoemd)

In deze openbare versie van het rapport zijn de namen van de techniekontwikkelaars geanonimiseerd.

Verder vraagt het Waddenfonds aan TNO om:

- te valideren wat de mogelijke jaarlijkse elektriciteitsproductie is van elk van de technieken in 2026 en 2030,
- te bepalen hoeveel apparaten er nodig zijn om de bovenstaande ambities te realiseren,
- een inschatting te maken of er voldoende ruimte (het fysieke ruimtebeslag én de praktische inpasbaarheid i.r.t. ecologie, kunstwerken, netbeperkingen) beschikbaar is voor deze apparaten in het Waddengebied, en
- een overzicht te geven van eventuele ecosysteemdiensten en aanvullende maatschappelijke baten.

Het Waddenfonds wordt volgens huidige voornemens in 2027 opgeheven. Om die reden hanteren we in dit onderzoek de horizon van 2030.

1.2 Aanpak onderzoek

Het vertrekpunt van het onderzoek is het TNO-rapport *“Stroom uit water”* uit 2020. In dit voorgaande rapport is de technische werking en het potentieel van verschillende EuW-technieken in Nederland behandeld (Lamboos & van der Brink, 2021). In het huidige onderzoek zijn de eerder genoemde zes techniekontwikkelaars en hun potentieel in het Waddengebied in meer detail behandeld. Er is bij de zes ontwikkelaars middels vragenlijsten

(Bijlage B) en interviews informatie opgehaald over de werking van de techniek, de opschaling van de techniek, de kosten, de baten, de aanlanding en de ecologische inpassing. Deze informatie is vervolgens door TNO beoordeeld en verwerkt in dit rapport. Verder hebben de bedrijven locaties binnen de Waddenzee en de Noordzeekustzone (tot 20 km uit de kust) aangegeven die in hun ogen kansrijk zijn voor toepassing van hun techniek. Hierbij hebben wij kritisch gekeken naar het aangegeven ruimtebeslag en huidige andere gebruiksfuncties in het Waddengebied (zoals scheepsvaart, bodemstoffenwinning en militaire gebieden). In dit rapport is additionele informatie uit de literatuur gebruikt waar deze bekend was bij de onderzoekers of als deze onder de aandacht is gebracht door de ontwikkelaars in de ingevulde vragenlijsten of tijdens de interviews. De ontwikkelaars hebben een conceptversie van dit rapport ontvangen en hebben via het Waddenfonds opmerkingen en suggesties kunnen aanleveren. Deze zijn door TNO verwerkt naar inzicht van TNO.

Er is geen additioneel onderzoek gedaan naar de ecologische, waterbouwkundige en hydrologische effecten van de verschillende technieken op specifieke locaties in het Waddengebied. Tot slot is er gesproken met Liander over hun visie van de technische inpassing van EuW-technieken op het elektriciteitsnet en met Rijkswaterstaat over vergunningsverlening rondom het realiseren van EuW in het Waddengebied.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 staat een analyse van het elektriciteitsverbruik in het Waddengebied. Deze analyse wordt later gebruikt om context te geven aan de hoeveelheid elektriciteit die door de EuW-technieken opgewekt kan worden in 2026 en 2030 en na te gaan in hoeverre de EuW-technieken bij kunnen dragen aan de doelen van het Waddenfonds.

Hoofdstuk 3 bevat de technologische review van alle technieken, met eerst een review van de golfenergie technieken (3.1), dan de getijdenenergie technieken (3.2) en ten slotte energie uit het spanningsverschil tussen zoet en zout water (3.3). Deze review is gebaseerd op vragenlijsten en interviews met de ontwikkelaars en reflecteert dus vooral een overzicht van de verschafte informatie vanuit de ontwikkelaars zelf.

Hoofdstuk 4 bevat een analyse over de realisatie van het EuW-potentieel in het Waddengebied. Eerst beschrijven we het theoretische potentieel per techniek. Vervolgens gaan we in op de aspecten rondom vergunningen en netinpassing. De gedeelten over vergunningen en netinpassing zijn gebaseerd op respectievelijk interviews met Rijkswaterstaat en Liander. We sluiten dit hoofdstuk af met een gerichte blik op alle zoekgebieden die de ontwikkelaars hebben aangegeven in het Waddengebied en bekijken per locatie welke kansen en risico's er liggen.

Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek.

2 Elektriciteitsverbruik in het Waddengebied

Voor het in perspectief brengen van de omvang van het EuW-potentieel is het interessant om deze te relateren aan de elektriciteitsbehoefte in het Waddengebied. Zo kan de effectiviteit van een bepaalde techniek worden uitgedrukt in de hoeveelheid huishoudens dat van stroom voorzien kan worden of het percentage van het elektriciteitsverbruik van een gemeente dat gedekt kan worden. Gezien de vraagstelling vanuit het Waddenfonds kijken we in dit hoofdstuk enkel naar het elektriciteitsverbruik. Overige energieverbruik, zoals aardgas voor de verwarming van huizen of voor bedrijven vormt geen onderdeel van deze analyse.

We hebben het elektriciteitsverbruik in het Waddengebied berekend aan de hand van bevolkingsdata en elektriciteitsverbruik per gemeente. Verder zijn er aan de hand van prognoses over bevolkingsgroei- of krimp en het installeren van warmtepompen inschattingen gemaakt over toekomstig elektriciteitsverbruik. De bevolkingsdata zijn afkomstig van het CBS (CBS, 2023), het elektriciteitsverbruik per gemeente wordt gerapporteerd door de Klimaatmonitor (Klimaatmonitor, 2023). In dit hoofdstuk lichten we de berekeningen en resultaten toe.

Het totale elektriciteitsverbruik in 2020 in het Waddengebied is 13.498 GWh (miljoen kWh). Hiervan is 2.425 GWh naar woningen gegaan. Zelf-opgewekte zonnestroom achter de meter is in dit getal meegenomen. Het elektriciteitsverbruik dat naar woningen gaat was het hoogst in Noord-Holland Noord: 857 GWh. Woningen in Friesland gebruikten 830 GWh en Groningen 738 GWh. Als we de Waddeneilanden apart nemen was het totale elektriciteitsverbruik in 2020 daar 142 GWh³, waarvan 35 GWh door woningen.

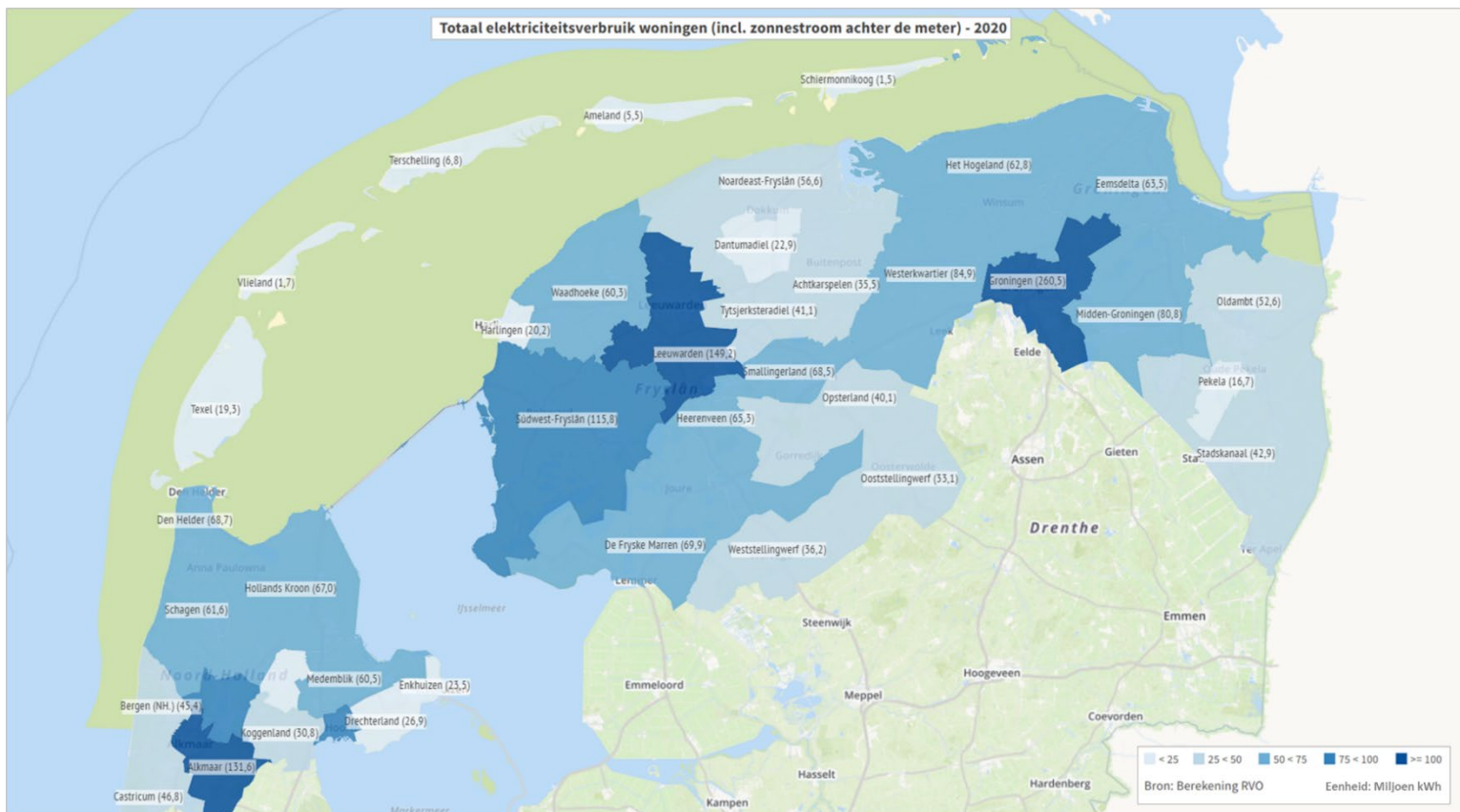
Het bevolkingsaantal in 2020 in het Waddengebied was ongeveer 1,8 miljoen. Hiervan wonen ongeveer 660.000 mensen in Noord-Holland Noord, 650.000 in Friesland en 590.000 in Groningen. Op de Waddeneilanden woonden ongeveer 24.000 mensen.

Als we kijken naar het elektriciteitsgebruik per capita dat naar woningen gaat zien we dat Noord-Holland Noord, Friesland en Groningen alle drie rond de 1330 kWh per persoon per jaar gebruiken. De Waddeneilanden zitten daar flink boven met een verbruik van 1470 kWh per jaar. Redenen hiervoor kunnen zijn dat er meer woningen geëlektrificeerd zijn op de Waddeneilanden, dat er meer recreatie plaats vindt of dat woningen gemiddeld groter zijn op de Waddeneilanden. In [Figuur A.3](#) in de Bijlage is te zien dat over het algemeen steden een lagere elektriciteitsvraag per capita hebben. [Figuur 2.1](#) geeft een overzicht van het elektriciteitsverbruik dat naar woningen gaat (inclusief direct gebruikte zonnestroom achter de meter). Deze informatie, en de data uit [Tabel 2.1](#), staan uitgesplitst per gemeente in Bijlage A.

³ Er is nog geen data beschikbaar van het elektriciteitsverbruik van het geëlektrificeerde gasproductieplatform van de NAM bij Ameland. Onze inschatting dat de elektriciteitsvraag toeneemt met 60-70 GWh per jaar (o.b.v. een vraag van 8 MW gedurende 8000-8500 uur per jaar).

Tabel 2.1: Overzicht van elektriciteitsverbruik, bevolkingsaantal en elektriciteitsverbruik per capita voor het Waddengebied (Klimaatmonitor, 2023). De totalen voor Friesland, Groningen en Noord-Holland Noord zijn inclusief de Waddeneilanden die daarbinnen liggen.

	totaal e-verbruik 2020 [GWh]	totaal e-verbruik woningen 2020 [GWh]	bevolking 2020	e-verbruik woningen per capita 2020 [kWh]
Waddeneilanden totaal	142	35	24.281	1.470
Friesland totaal	3.053	830	649.957	1.330
Groningen totaal	5.863	738	585.866	1.334
Noord-Holland Noord totaal	4.440	857	662.748	1.318



Figuur 2.1: Totaal elektriciteitsgebruik naar woningen per gemeente in 2020. Bron: Klimaatmonitor, berekend door RVO.

Tabel 2.2 geeft de bevolkingsmutatie en prognose van het elektriciteitsverbruik weer. De bevolkingsmutatie houdt de verwachte groei of krimp in van bevolking in een bepaald gebied. Eerst is de mutatie tussen 2020 en 2025 weergegeven, en daarna de mutatie tussen 2020 en 2030. Er is te zien dat Noord-Holland Noord en Friesland een kleine groei verwachten, Groningen een kleine krimp en de Waddeneilanden een relatief grote bevolkingsgroei (echter is dit in absolute aantallen niet zo groot).

Tabel 2.2: Bevolkingsmutatie en prognose voor elektriciteitsverbruik naar woningen voor 2025 en 2030. Bron: CBS voor bevolkingsmutaties en de KEV 2022 voor prognoses over all-electric warmtepompen.

	bevolkingsmutatie 2020-2025	bevolkingsmutatie 2020-2030	e-verbruik woningen prognose 2025 [GWh]	e-verbruik woningen prognose 2030 [GWh]
Waddeneilanden totaal	5,05%	5,20%	38	39
Friesland totaal	1,11%	0,46%	866	892
Groningen totaal	-0,69%	-2,13%	780	804
Noord-Holland Noord totaal	1,69%	2,50%	915	942

Met de inschatting van de bevolkingsaantallen in 2025 en 2030 berekenen we hoeveel elektriciteitsverbruik er in de toekomst naar woningen zal gaan. Een deel van het elektriciteitsgebruik van woningen gaat naar licht, tv's, koelkasten en andere apparaten. Deze elektriciteitsvraag zal per huishouden waarschijnlijk niet significant veranderen richting 2030. Wat wél zal veranderen is het aantal woningen dat met een warmtepomp verwarmd wordt in plaats van met een cv-ketel op aardgas. Om het toekomstige elektriciteitsverbruik per huishouden te bepalen moeten we dus weten hoeveel elektriciteit een warmtepomp gebruikt en hoe veel er naar verwachting geïnstalleerd zullen zijn in 2025 en 2030.

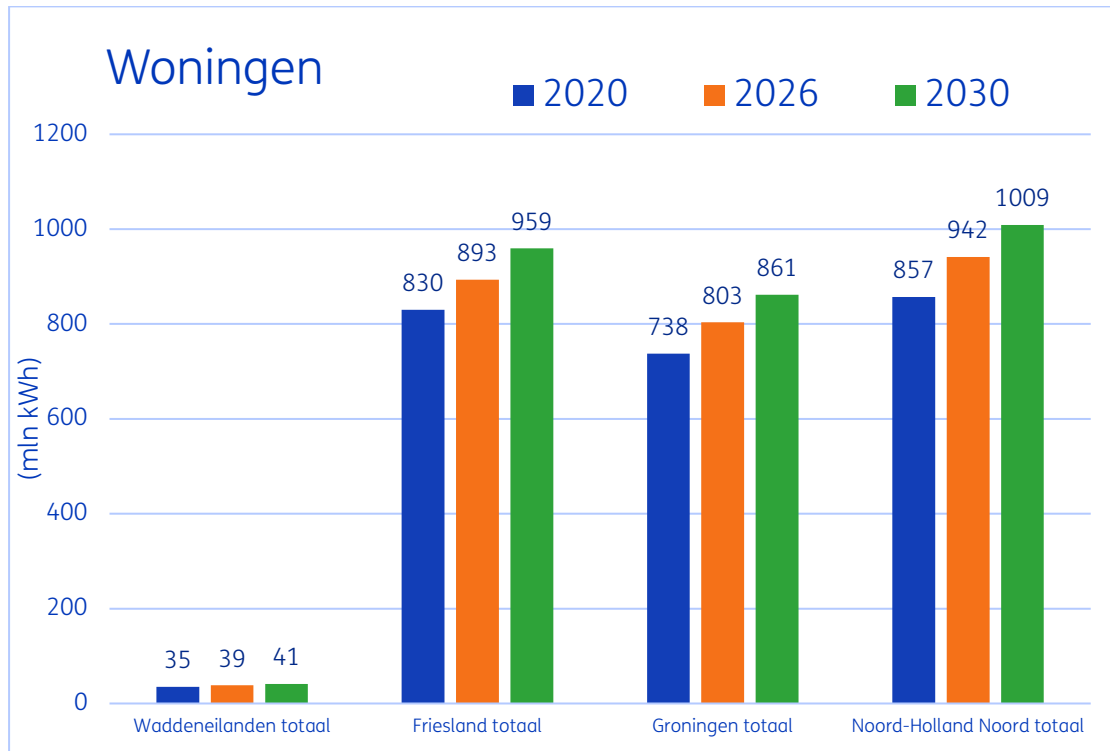
Volgens PBL verbruikt een gemiddelde woning aangesloten op een gas- of warmtenet ongeveer 2340 kWh elektriciteit per jaar (Luteijn, Bik, & van Polen, 2021). Volgens hetzelfde rapport verbruikt een all-electric woning, waarbij dus verwarmd wordt met een warmtepomp, ongeveer 5200 kWh per jaar. Het verwarmen van een woning met een full-electric warmtepomp gebruikt dus ongeveer 2860 kWh per jaar. Een gemiddeld huishouden bestaat uit 2,13 personen (CBS, 2023) dus de hoeveelheid stroom die extra benodigd is om elektrisch te verwarmen komt neer op ongeveer 1342 kWh per capita.

In 2020 was het percentage huizen dat verwarmd wordt met een full-electric warmtepomp nagenoeg nul. De Klimaat en Energieverkenning 2022 verwacht dat in 2025 ongeveer 5% van de huizen een full-electric warmtepomp heeft en in 2030 ongeveer 10% (PBL, TNO, CBS & RIVM, 2022). Hybride warmtepompen zijn niet meegenomen in deze analyse, wat tot een overschatting van het elektriciteitsgebruik kan leiden.

Als we nu het huidige elektriciteitsverbruik vermenigvuldigen met de bevolkingsmutatie en de hoeveelheid extra elektriciteit van nieuwe warmtepompen meenemen hebben we een complete prognose voor het elektriciteitsgebruik in 2026 en 2030 – aangenomen dat 2025 en 2026 niet heel erg zullen verschillen. Een overzicht hiervan is te zien in [Figuur 2.2](#).

Ook meegenomen in [Figuur 2.2](#) is een prognose van de toename van het thuis opladen van elektrische voertuigen. Hiervoor is CBS-data gebruikt om het aantal personenauto's per

gemeente in te schatten (CBS, 2023) (CBS, 2022). Op basis hiervan, is een toename van ongeveer 2% elektrische voertuigen in 2020 naar ongeveer 8% in 2026 en ongeveer 16% in 2030 aangenomen op basis van de KEV 2022 (PBL, TNO, CBS & RIVM, 2022). Daarnaast is uitgegaan van een typisch verbruik van 2000 kWh per jaar per EV op basis van typisch verbruik van 20 kWh per 100 km en 10.000 km per jaar. Hierbij is aangenomen dat in 2026 50% van de laadpunten thuislaadpunten zijn en in 2030 44%, volgens de prognose van de Nationale Agenda Laadinfrastructuur (Nationale Agenda Laadinfrastructuur, 2023).



Figuur 2.2: Elektriciteitsgebruik naar woningen incl. direct gebruikte zonnestroom achter de meter voor het Waddengebied. Voor de prognose van 2026 en 2030 is de bevolkingsgroei of -krimp meegenomen, de verwachte hoeveelheid extra full-electric warmtepompen en een prognose van thuisladen van elektrische voertuigen.

Op de Waddeneilanden zijn al zeker 4400 zon-PV-installaties geïnstalleerd (zie [Tabel 2.3](#)). In totaal is er bijna 40 MWp aan vermogen geïnstalleerd. Grofweg 50% hiervan ligt op Texel en ongeveer een kwart op Ameland. Ten opzichte van 2021 is het totale geïnstalleerde vermogen zon-PV op de Waddeneilanden gestegen met meer dan 5 MWp, waarvan 2,6 MWp op Texel en bijna 1 MWp op Ameland. Van het totaal is ruim 12 MWp geïnstalleerd bij woningen. Ook bij de woningen is de grootste stijging in geïnstalleerd vermogen in 2022 ten opzichte van 2021 op Texel (1 MWp) en Ameland (0,5 MWp). Op Ameland wordt dit jaar een verdere uitbreiding met circa 3 MWp verwacht, gecombineerd met batterijen voor energieopslag (Gemeente Ameland; AEC; Wetterskip Fryslan, 2021).

Het CBS heeft geen gepubliceerde getallen over de productie van zonnestroom op de eilanden en daarom hebben we de productie zelf ingeschat op basis van 875 vollasturen per jaar (RVO, 2022). In totaal wordt er op basis van deze inschatting jaarlijks 35 GWh zonnestroom geproduceerd op de eilanden, ongeveer net zoveel als het totale elektriciteitsverbruik van woningen op de Waddeneilanden.

Tabel 2.3: Aantal installaties zon-PV, vermogen en inschatting productie zonnestroom op de Waddeneilanden in 2022. Bron: CBS. Eigen inschatting productie zonnestroom op basis van 875 vollasturen per jaar.

Gemeente	Aantal installaties	Totaal opgesteld vermogen [kWpiek]	Opgesteld vermogen bij woningen [kWpiek]	Totale productie van zonnestroom (ingeschat) [GWh]	Productie van zonnestroom bij woningen (ingeschat) [GWh]
Ameland	653	9.717	1.948	9	2
Schiermonnikoog	239	2.800	629	2	1
Terschelling	634	5.327	1.802	5	2
Texel	2.606	18.663	7.159	16	6
Vlieland	307	3.004	744	3	1
Totaal	4.439	39.511	12.282	35	11

3 Technologische review

In dit hoofdstuk wordt per techniek een overzicht gegeven. Het voorgaande rapport “*Stroom uit water*” (Lamboos & van der Brink, 2021) is gebruikt als startpunt voor de werking van de technieken en de kostenanalyse. Deze informatie is aangevuld met informatie van de ontwikkelaars over de verschillende ontwerpen. Voor golf- en getijdenenergie wordt er bovendien een vergelijking gemaakt tussen de ontwerpen van de drie ontwikkelaars en gereflecteerd op de verwachtingen in vermogens en jaarlijkse productie. De inbreng van de marktpartijen vormt de basis van overzichten over de opschaling van de ontwerpen en de benodigde infrastructuur om de projecten in het energiesysteem in te passen. Ten slotte wordt er naast de kosten ook stilgestaan bij de opbrengsten.

3.1 Golfenergie

3.1.1 Werking van de techniek

Met een golfenergieconverter wordt er energie gewonnen uit de snel wisselende waterhoogte die het effect is van het passeren van golven. Er zijn veel verschillende technieken om energie te winnen. Enkele voorbeelden zijn vlotter die verticaal oscilleren of scharnieren, luchtkamers in waterkeringen die druk gebruiken en turbines die de retourstroom van golven aftoppen. Er zijn in Nederland en wereldwijd meerdere pilots en demonstratieprojecten (Technology Readiness Level (TRL) 5-8), maar nog geen rendabele commerciële projecten (van Druten & Kruit, 2019).

Er is veel aandacht voor het ontwikkelen van golfenergieconverters voor de oceanen waar de hoogste golven en het hoogste potentieel te vinden zijn. De golfcondities in de Noordzee zijn relatief mild, waardoor het potentieel voor energiewinning uit golven kleiner is dan op andere plekken in de wereld (IPCC, 2011). De frequentie van de golven is wel groter dan op de oceaan. Een aantal (Nederlandse) leveranciers ontwikkelt golfenergieconverters die specifiek toegepast kunnen worden in het mildere golfklimaat van de Noordzee. Een voordeel hierbij is dat de converters kleinere krachten te verduren krijgen. De investeringskosten per MW kunnen lager zijn doordat de golfenergieconverters minder zwaar en stevig gebouwd hoeven te worden dan golfenergieconverters bedoeld voor locaties met hoge golfcondities (Lavidas & Polinder, 2019). Belangrijk is om de golfenergieconverters zo te dimensioneren dat de jaarlijkse elektriciteitsproductie bij de beoogde golfcondities gemaximaliseerd wordt (Lavidas & Polinder, 2019). Door slim te ontwerpen kan er geleerd worden in relatief rustige condities waarna uitbreiding naar de oceanen mogelijk is.

Golven vormen zich door een combinatie van lokale wind en eerder ontstane golven die elders zijn opgewekt (KNMI, 2023). Deze complexe opsomming zorgt ervoor dat de grootte en frequentie van golven van nature variabel is. Hierdoor is het potentieel van golfenergie ook variabel. Het moment dat golfenergie kan worden geoogst loopt 1-12 uur achter op het moment dat windenergie aankomt, waardoor er nadat de wind is gaan liggen nog wel golfenergie geproduceerd kan worden (Gonzalez-Aparicio, Houwing, & Vitulli, 2023). Golven die opgewekt worden door lokale wind volgen de wind sneller op (~1 uur) dan golven die elders zijn opgewekt (~12 uur). Gezamenlijk is het tijdsverschil tussen windenergie en golfenergie op de Noordzee ongeveer 3 uur (Gonzalez-Aparicio, Houwing, & Vitulli, 2023).

Golfenergie kan zodoende elektriciteitsproductie uit wind-op-zee aanvullen en een dempende werking hebben op de variabiliteit van levering van elektriciteit vanaf zee. Hoe significant die demping is, is afhankelijk van de verhouding van opgestelde vermogens wind-op-zee en golfenergie. Het toevoegen van 1 MW tot 15 MW golfenergie aan een 15 MW windturbine op zee verhoogt de constante elektriciteitsproductie met respectievelijk 1% en 13% (Gonzalez-Aparicio, Houwing, & Vitulli, 2023).

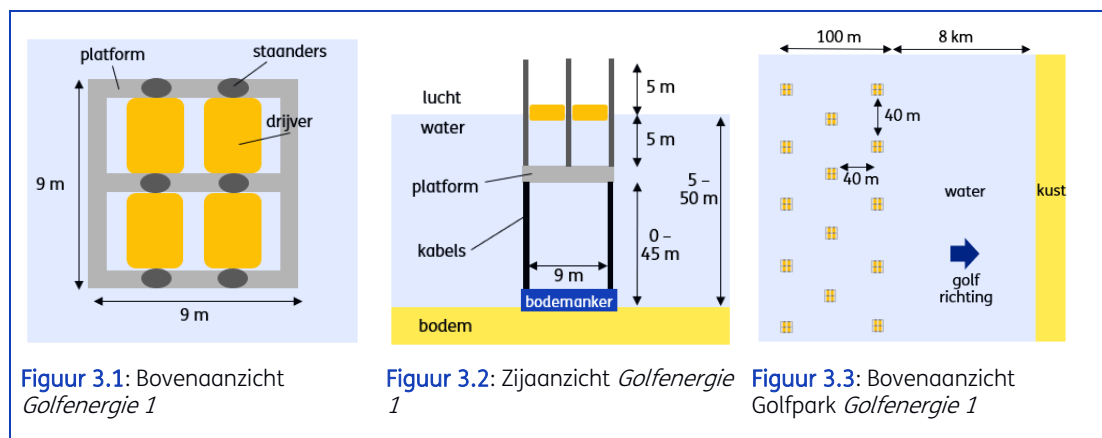
Nu zal kort worden ingegaan op de werking van de drie verschillende golfenergieconverters en hun configuratie in een golfpark.

3.1.1.1 *Golfenergie 1*

De technologie van *Golfenergie 1* berust op een cilindervormige drijver die boven op de golven ligt en daardoor op en neer beweegt, waarbij de drijver roteert. De rotatie wordt omgezet in elektriciteit middels een generator binnenin de drijver.

In het bovenaanzicht (Figuur 3.1) is te zien dat de drijvers (in geel) vastgehouden worden door staanders, en dat er vier drijvers per platform zijn. Elk platform is ongeveer 9 bij 9 meter groot. Dit platform wordt vervolgens vastgehouden middels kabels die naar een bodemanker lopen (Figuur 3.2). Doordat de lengte van de kabels die het platform vasthouden gemakkelijk kan variëren kan het apparaat geplaatst worden op locaties met een diepte tussen 5 tot 50 meter. De staanders op het platform zelf zijn 10 meter lang, waarvan 5 meter boven het wateroppervlak uitsteekt bij een kalme zee. Een dergelijke installatie heeft volgens *Golfenergie 1* een vermogen van 100 kW, bestaande uit 25 kW per drijver.

In een golfpark waar meerdere apparaten opgesteld zijn liggen deze in bijvoorbeeld drie versprongen rijen (Figuur 3.3). Elk van de rijen ligt ongeveer 40 meter uit elkaar en de onderlinge afstand tussen de apparaten is ook 40 meter. Een opstelling van 50 apparaten samen met een totaal vermogen van 5 MW levert volgens *Golfenergie 1* ongeveer 15 GWh per jaar aan elektriciteit.



Figuur 3.1: Boven-aanzicht *Golfenergie 1*

Figuur 3.2: Zijaanzicht *Golfenergie 1*

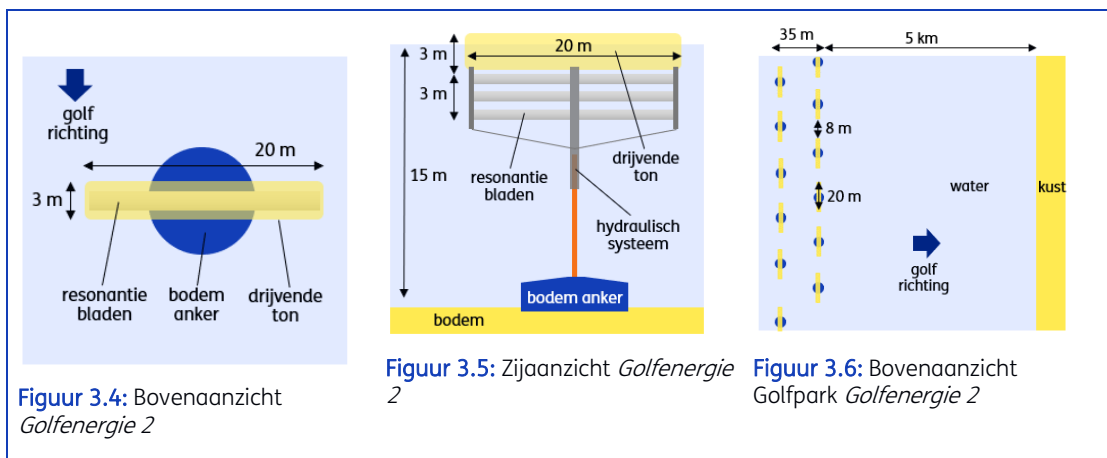
Figuur 3.3: Boven-aanzicht *Golfpark Golfenergie 1*

3.1.1.2 *Golfenergie 2*

De technologie van *Golfenergie 2* berust op een drijver met resonantiebladen die verbonden zijn met een anker op de bodem via een hydraulische pomp. De op- en neergaande beweging van de *Golfenergie 2* t.o.v. het anker genereert hydraulische druk die in de drijver omgezet wordt in elektriciteit.

In het bovenaanzicht (Figuur 3.4) is te zien dat de drijver ongeveer 20 meter lang is en een diameter heeft van drie meter. Onder de drijver zijn resonantiebladen (drie meter hoog) bevestigd die helpen bij het meebewegen van het apparaat met de korte, kleine golven op de Noordzee (Figuur 3.5). In eerste instantie heeft *Golfenergie 2* aangegeven de apparaten te willen installeren op een diepte van 15 meter, maar installatie op een diepere locatie zou ook kunnen. Een dergelijke installatie heeft volgens *Golfenergie 2* een vermogen van 300 kW.

In een golfpark, waar meerdere apparaten opgesteld zijn, liggen deze in twee deels-overlappende lijnen (Figuur 3.6). De overlap tussen twee apparaten is ongeveer 6 meter en de afstand tussen de twee rijen is ongeveer 35 meter. Een opstelling van ongeveer 17 apparaten samen met een totaal vermogen van 5,1 MW levert volgens *Golfenergie 2* ongeveer 5 GWh per jaar aan elektriciteit.

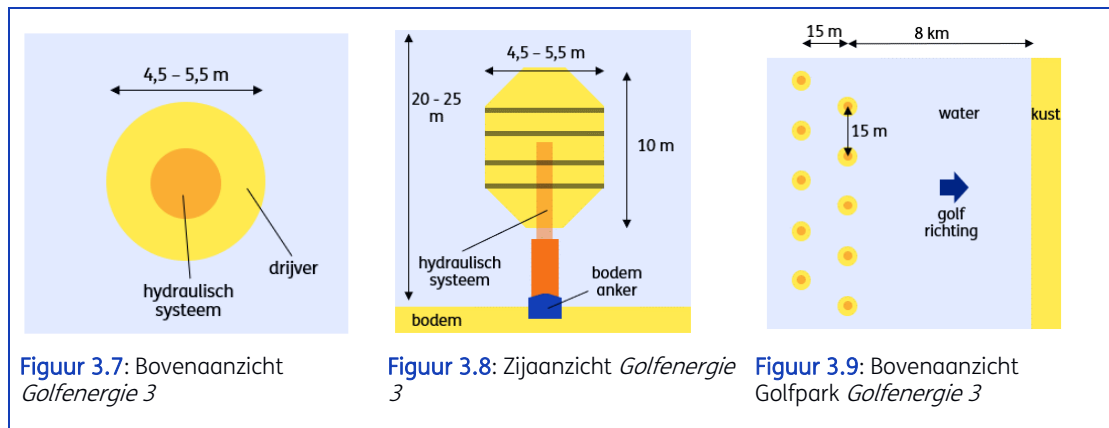


3.1.1.3 *Golfenergie 3*

De technologie van *Golfenergie 3* berust op een drijver die onder het wateroppervlak blijft. Door de wisselende waterdruk van golven beweegt de drijver op en neer, waarmee in een hydraulisch systeem elektriciteit opgewekt wordt.

In het bovenaanzicht is te zien dat een ronde drijver (verticaal georiënteerd) van ongeveer 4,5 tot 5,5 meter bevestigd is rondom een water hydraulisch systeem (Figuur 3.7). De drijver zelf is ongeveer 10 meter hoog en zit via het water hydraulische systeem vast aan de bodem met een anker (Figuur 3.8). Het apparaat wordt op locaties met een diepte tussen 20 en 25 meter geïnstalleerd. Tot slot kan de interne weerstand van het water hydraulische systeem op afstand worden aangepast zo dat deze te allen tijde de karakteristieken van golven zo optimaal mogelijk kan volgen om elektriciteit op te wekken. Een dergelijke installatie heeft volgens *Golfenergie 3* een vermogen van 100 kW.

In een golfpark, waar meerdere apparaten opgesteld zijn, liggen deze in twee versprongen lijnen (Figuur 3.9). De rijen liggen ongeveer 15 meter uit elkaar en de onderlinge afstand tussen twee apparaten is ook 15 meter. Een opstelling van 50 apparaten samen met een totaal vermogen van 5 MW levert volgens *Golfenergie 3* ongeveer 11 GWh per jaar aan elektriciteit.



Figuur 3.7: Bovenaanzicht *Golfenergie 3*

Figuur 3.8: Zijaanzicht *Golfenergie 3*

Figuur 3.9: Bovenaanzicht *Golfpark Golfenergie 3*

3.1.1.4 Vergelijk ontwerpen golfenergie

In de voorgaande paragrafen zijn significante verschillen te zien tussen de apparaten en opstellingen van de verschillende ontwikkelaars. In deze paragraaf maken we een vergelijking op een aantal belangrijke parameters.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van verschillen voor een 5 MW golfpark. *Golfenergie 1* en *Golfenergie 3* hebben beiden 50 apparaten van 100 kW nodig voor een dergelijk golfpark. Bij *Golfenergie 1* bestaat elk apparaat weer uit 4 tonnen van 25 kW per stuk. *Golfenergie 2* heeft 17 apparaten van 300 kW nodig voor een golfpark van 5 MW. De verschillen in grootte per apparaat geeft een aantal verschillen in de verhouding tussen het geïnstalleerde vermogen en de jaarlijkse elektriciteitsproductie. *Golfenergie 1* heeft het kleinste apparaat die in dezelfde golfcondities relatief vaak op vol vermogen opereert en daarmee een relatief hoog aantal vollasturen bereikt. Bij golfcondities boven het operationele venster wordt er niet meer elektriciteit geproduceerd of worden de apparaten uitgezet. Dit resulteert in een relatief vlak productieprofiel gedurende het jaar, vergeleken met de grotere apparaten.

Anderzijds heeft *Golfenergie 2* een relatief groot apparaat die in dezelfde golfcondities relatief minder vaak op volle capaciteit opereert en daarmee een relatief laag aantal vollasturen bereikt. Het operationele venster ligt bij hogere golven en hogere golf frequenties dan die van *Golfenergie 1*. Het valt dan ook te verwachten dat de productie van *Golfenergie 2* apparaten meer meebeweegt met de golfcondities gedurende het jaar. *Golfenergie 2* geeft aan dat het apparaat ook ontworpen is met locaties met hogere gemiddelde golfenergie in gedachten, zoals verder ten noorden van de Waddeneilanden (zie paragraaf 4.1.1).

Het apparaat van *Golfenergie 3* ligt qua grootte tussen de twee andere golfenergie-technieken in en bereikt daarmee ook een aantal vollasturen die hier tussenin ligt. *Golfenergie 3* zoekt een optimum tussen maximale elektriciteitsproductie en kosten per kilowattuur. *Golfenergie 3* geeft aan dat het ontwerp nog geoptimaliseerd kan worden op basis van de golfcondities op een locatie door aanpassingen te maken aan de drijver.

Van alle drie de ontwikkelaars hebben we data gekregen over golfregimes in of in de buurt van het Waddengebied en de bijbehorende productieprofielen van de golfenergieconverters (zogenoemde power-matrices, op basis van modelberekeningen of empirische metingen). Hoewel het binnen de kaders van dit onderzoek niet mogelijk is geweest om de power-matrices grondig te onderzoeken of toe te passen op golfenergie data voor het Waddengebied, zien we in deze technische review een consistent beeld van de aangeleverde data. Het is daarmee ook ons beeld dat de verhoudingen tussen de beoogde geïnstalleerde vermogens en jaarlijkse elektriciteitsproductie per apparaat in het Waddengebied passend zijn bij de ontwerpen.

In **Tabel 3.1** wordt ook de benodigde ruimte aangegeven, exclusief eventuele veiligheidszones rondom de golfparken. De benodigde ruimte van de opstelling volgt uit de benodigde ruimte tussen de apparaten die is opgegeven door de ontwikkelaars. *Golfenergie 1* houdt rekening met relatief veel afstand tussen de apparaten, waardoor de inschatting voor benodigde ruimte een stuk groter is dan bij de twee andere ontwikkelaars.

De ontwikkelaars hebben nog geen definitieve ontwerpen voor 5 MW parken en de inschattingen voor benodigde ruimte kan daardoor de komende jaren nog aanzienlijk veranderen. Optimalisatie van de afstand tussen de apparaten en eisen rondom een minimale afstand voor veiligheidszones kunnen bijvoorbeeld nog invloed hebben. In dit stadium van de ontwikkeling van de technieken is deze parameter dan ook alleen indicatief.

Tabel 3.1: Vergelijk golfpark van 5 MW van de verschillende ontwikkelaars.

Ontwikkelaar	Aantal apparaten	Elektriciteitsproductie [GWh per jaar]	Vollasturen	Ruimte [hectare]
<i>Golfenergie 1</i>	50	15	3000	10
<i>Golfenergie 2</i>	17	5	1000	0,9
<i>Golfenergie 3</i>	50	11	2200	11

3.1.2 Opschaling van de techniek

De huidige Technology Readiness Level (TRL) van *Golfenergie 1* en *Golfenergie 3* is 4 tot 5. *Golfenergie 1* heeft schaaltests uitgevoerd bij Marin en Deltares. *Golfenergie 3* is van plan in 2023 tests uit te voeren in Schotland, met het doel om eind 2023 een volledige test te doen in het water van een zeemodel van 40 kW. *Golfenergie 3* geeft ook aan dat ze al ervaring opgedaan hebben met het testen van een apparaat met vergelijkbare werking van de techniek, ongeveer 20 jaar geleden. Enkele onderdelen van het ontwerp van *Golfenergie 3* zijn nieuw en worden dus nu voor het eerst getest. *Golfenergie 2* demonstreert momenteel een schaalmodel op zee (TRL 5-6).

Belangrijke vervolgstappen voor de opschaling van de golfenergie-technieken zijn:

- Het op zee demonstreren van de ontwerpen op volledige schaal,
- Het testen van meerdere apparaten in een array en
- De uitrol van een commerciële schaal golfpark.

Golfenergie 2 verwacht in 2024 een eerste volle schaal demonstratie te realiseren (300 kW) en een golfpark van 6 apparaten in 2025 (2,4 MW). *Golfenergie 2* beoogt commerciële uitrol vanaf 2026 te realiseren en *Golfenergie 3* vanaf 2027, met de verkoop en installatie van tientallen tot duizenden apparaten. *Golfenergie 1* verwacht eind 2024 een demonstratieproject te realiseren van 25 kW (één ton, zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Een volledige schaal demonstratie van 100 kW wordt in 2026 verwacht. *Golfenergie 1* beoogt ook in de periode tot 2030 hun apparaat te ontwikkelen tot een commercieel product.

3.1.3 Infrastructuur en netinpassing

De ontwikkelaars beogen de aanlanding van elektriciteit via elektriciteitskabels naar het vasteland (Noord-Holland) of naar de Waddeneilanden. Ontwikkelaars hebben plannen om meerdere apparaten te koppelen om de hoeveelheid kabels en elektronica te beperken. Het koppelen van meerdere apparaten betekent ook dat het profiel van de elektriciteitslevering afvlakt omdat niet alle apparaten tegelijkertijd net zo veel elektriciteit produceren bij een passerende golf. In zee of op land is er een conversiestation nodig om de onregelmatige

golfenergie in het elektriciteitsnet te voeden. Om inpassing te vergemakkelijken wordt er door *Golfenergie 2* ook een project ontwikkeld voor het inzetten van batterijopslag op land. *Golfenergie 2* geeft ook aan de mogelijkheden voor warmteconversie en -opslag te verkennen voor betere inpassing van de golfenergie. Hier wordt nog onderzoek naar gedaan. *Golfenergie 2* verwacht hier binnenkort een aanvraag voor een project in te dienen bij het Waddenfonds. *Golfenergie 1* onderzoekt ook verschillende vormen van netinpassing, maar hierover zijn geen details bekend.

3.1.4 Ecologische en andere maatschappelijke effecten

Alle ontwikkelaars hebben aandacht voor ecologische effecten van golfenergie, en ook al studies laten verrichten, of deze lopen nog. Monitoring is een onderdeel van de uitrol. Ongewenste effecten worden niet ontkend (bijvoorbeeld geluid) maar de verwachting is dat er positieve effecten tegenover zullen staan. Volgens de ontwikkelaars zijn er geen tot nauwelijks negatieve ecologische effecten te verwachten. Deze onderzoeken zijn uitgevoerd op basis van één unit. De impact van een kleinschalig demonstratieproject is klein, maar op commerciële schaal is wellicht grotere impact mogelijk. De ontwikkelaars hebben aangegeven naar verwachting niet met giftige materialen te werken.

Deels grijpen de effecten aan op ecologie, deels ook op kustbescherming. Effecten die genoemd worden: broedplaatsen, vegetatie en aangroeimogelijkheden creëren (toename van o.a. schelpdieren en vissoorten, en biodiversiteit in het algemeen). Er is wel een opruimplicht waardoor ecologische voordelen verbonden aan het plaatsen van hard substraat (zoals bodemverankering) alleen gelden gedurende de periode van projectexploitatie. Met betrekking tot de zeekering is er een effect op zandverplaatsing en demping van de golven. Verhoogde activiteit ten behoeve van plaatsing en onderhoud.

3.1.5 Kosten en opbrengsten

In het onderzoek naar energie uit water ten behoeve van de verkenning elektriciteit uit water (Lamboos & van der Brink, 2021) is er op basis van literatuur een overzicht gemaakt van de kosten van golfenergie. Deze informatie is vervolgens getoetst bij marktpartijen.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de investeringskosten, operationele kosten en de gemiddelde kostprijs per geproduceerde kilowattuur uit het rapport. De kosten voor 2020 zijn gebaseerd op een inventarisatie van internationale industriedata en literatuur door Hoefnagels (2020) voor een Oscillating Body System (OBS) golfenergiesysteem (het vaakst voorkomende ontwerp voor golfenergiesystemen). De kosten voor 2030 zijn gebaseerd op schattingen van het JRC over hoeveel de kosten dalen bij een stijging van het wereldwijd geïnstalleerde vermogen.⁴ Voor zowel 2020 als 2030 is er een brede bandbreedte te zien voor de kosten, wat de onzekerheid weergeeft over de huidige kosten van golfenergie en de ontwikkeling daarvan richting 2030.

⁴ Ook wel bekend als leercurves.

Tabel 3.2: Inschattingen kosten golfenergie in 2020 en 2030 op basis van geanalyseerde literatuur en berekeningen (Lambooy & van der Brink, 2021).

Kosten	2020			2030		
	Laag	Midden	Hoog	Laag	Midden	Hoog
Investeringskosten (€/kW)	5000	7250	9500	2350	5950	6500
Vaste operationele kosten (€/kW/jaar)	125	300	450	82	208	228
LCOE (€/kWh)	0,29	0,71	1,59	0,13	0,32	0,35

De antwoorden op onze vragenlijst en de interviews bevestigen het beeld van onzekerheid over de huidige en toekomstige kosten.

Golfenergie 1 heeft aangegeven investeringskosten van 4200 €/kW te verwachten bij productie van 500 apparaten en 2500 €/kW bij productie van 1000 apparaten. De verwachte operationele kosten zijn bij deze productieaantallen respectievelijk 100 en 50 €/kW/jaar. Met deze verwachte kosten valt *Golfenergie 1* in de bandbreedte van laag-midden in 2030 in **Tabel 3.2**. *Golfenergie 2* geeft aan lagere investeringskosten te hebben dan de bandbreedte in **Tabel 3.2**. *Golfenergie 2* denkt dat dit komt doordat golfenergie op oceanen domineert in de literatuurdata en niet representatief zijn voor de kosten voor golfenergie op de Noordzee. De huidige kosten zijn volgens *Golfenergie 2* ongeveer 3000 €/kW, maar de kostenopbouw is nog onderwerp van onderzoek. Ze verwachten een kostprijs van 0,25 €/kWh bij 24 units (7,2 MW), 12,5 €/kWh bij 400 units (120 MW), 0,08 €/kWh bij 1000 units (300 MW) en 0,05 €/kWh bij 5000 units (1,5 GW).

Golfenergie 3 heeft voor dit onderzoek geen duidelijke getallen aangeleverd voor de huidige investeringskosten. Wel verwijzen zij naar enkele studies die gedaan zijn naar toekomstige kosten van *Golfenergie 3* apparaten. De door *Golfenergie 3* voorziene toekomstige investeringskosten van rond de 3000 €/kW, bij ten minste 5000 apparaten geïnstalleerd, komt goed overeen met de laag tot midden waardes uit de bandbreedte van de tabel. De voorziene operationele kosten kennen een grote bandbreedte afhankelijk van hoeveel systemen er geïnstalleerd worden, het rendement van de systemen en de onderhoudsstrategie. In grote lijnen komen de operationele kosten wel overeen met de bandbreedte in **Tabel 3.2**, met een LCOE van boven de 0,50 €/kWh voor 7 units (700 kW) en een duurdere onderhoudsstrategie tot onder de 0,04 €/kWh bij 5000 units (500 MW) en een gunstige onderhoudsstrategie.

De drie ontwikkelaars geven aan dat de kosten op termijn sterk kunnen dalen en competitief kunnen worden, op voorwaarde dat er voldoende installaties gerealiseerd worden (honderden of zelfs duizenden geïnstalleerde apparaten) uitgaande van een vergelijkbare learning curve als zon en wind hebben doorlopen. Om een snellere kostendaling te realiseren is het nodig dat de opschalingspaden van de diverse technieken versneld worden.

Voor eerste projecten verwachten we dat er subsidies in de vorm van investeringssubsidies (bv. DEI+ of regionale subsidies zoals die van het Waddenfonds) en operationele subsidies (bv. SDE++) nodig zullen zijn voor golfenergieprojecten. Of er op langere termijn (2030 of daarna) ook (operationele) subsidies nodig zijn is afhankelijk van de ontwikkeling van de kostprijs van golfenergie (zie ook hierboven) en de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit.

Voor de verkoop van elektriciteit zijn twee mogelijkheden: stroomafnameovereenkomsten (*Power Purchase Agreements, PPA's*) of verkoop op de elektriciteitsmarkt. Met

stroomafnameovereenkomsten worden tussen exploitant en afnemer afspraken gemaakt voor de prijs voor de afgenomen elektriciteit. Dit geeft projectontwikkelaars de zekerheid over inkomsten en afnemers de zekerheid over de levering van duurzame elektriciteit tegen een afgesproken vergoeding. Afnemers kunnen bijvoorbeeld lokale bedrijven of gemeentes zijn die lokale duurzame elektriciteit willen inkopen.

Omdat golfenergie ook elektriciteit produceert wanneer het niet waait en de zon niet schijnt is het de verwachting dat de gemiddelde opbrengsten van de verkoop van elektriciteit van golfenergieprojecten hoger zijn dan gemiddelde opbrengsten van zon- en windenergie (EVOLVE, 2023). Dat komt doordat de marktprijs op deze momenten bepaald wordt door duurdere opwekinstallaties (zoals gascentrales). Dit is voordelig voor de business case voor golfenergieprojecten, die daarmee relatief sneller rendabel kunnen worden.

3.2 Getijdenenergie

3.2.1 Werking van de techniek

Onder invloed van het getij stroomt er water van en naar de kust. In estuaria komt veel van dit water samen en is de stroming vaak sterk. Uit het stromende water kan energie gewonnen worden met stromingsturbinen. Er zijn meerdere varianten van vrije stromingsturbinen in ontwikkeling. De meest gevorderde daarvan zijn turbines waar de bladen om een horizontale as draaien. Deze horizontale-as turbines werden in Nederland voor het eerst op commerciële schaal (TRL 8) ingezet bij de Oosterscheldekering (Tocado, 2020) (van Druten & Kruit, 2019). Wereldwijd staan voorlopers op het punt om TRL 9 te behalen (JRC, 2019). Andere varianten van vrije getijdestromingsconcepten zijn verticale-as turbines en ontwerpen die gebruik maken van een onderwatervlieger. Deze varianten zijn nog in eerdere stadia van ontwikkeling (TRL 4-7) (van Druten & Kruit, 2019) (JRC, 2019). Er wordt door het Nederlandse bedrijfsleven aan alle drie de varianten van vrije stromingsturbinen gewerkt (MET-Support, 2015).

Getijde vormt zich door de aantrekkingskracht van de maan en de zon op het water van de aarde. Getijde is niet afhankelijk van plaatselijke weersomstandigheden en is vanwege die reden jaren van tevoren nauwkeurig voorspelbaar (Rijkswaterstaat, 2023). Vanwege deze voorspelbaarheid van het getij is dus de elektriciteitsproductie van getijdenenergie ook erg voorspelbaar. Dat kan voordelen hebben op een fluctuerende elektriciteitsmarkt die voornamelijk gevoed wordt door minder voorspelbare wind- en zonne-energie. De getijcyclus duurt 12 uur en 25 minuten, dat betekent dat er elke dag ongeveer twee keer hoog- en laag water is. Getijdenconverters zullen dus op de vier momenten per dag daartussen, wanneer er stroming is, elektriciteit leveren.

Nu zal kort worden ingegaan op de werking van de twee verschillende getijdenenergieconverters en hun configuratie in een getijdenpark.

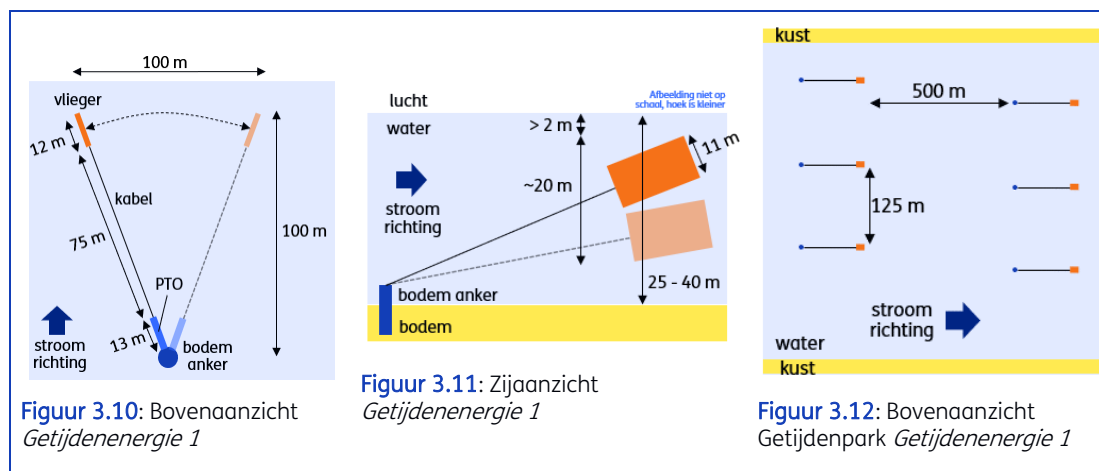
3.2.1.1 *Getijdenenergie 1*

De technologie van *Getijdenenergie 1* berust op een vlieger die door stromend water heen en weer vliegt. Een set vleugels in de vlieger zorgen voor een trekkende kracht aan de kabel van de vlieger waarmee elektriciteit opgewekt kan worden.

In het bovenaanzicht is te zien dat aan een bodemanker een Power Take-off Unit (PTO) is bevestigd (Figuur 3.10). Hier zit vervolgens een lange kabel aan vast met de vlieger. De totale lengte van het apparaat is ongeveer 100 meter. Het apparaat vliegt elke 40

seconden heen en weer over een gebied van ongeveer 100 meter. Bij omgekeerde stroomrichting zal de vlieger omdraaien zodat deze weer stroomafwaarts hangt. Het apparaat zou bij een diepte groter dan 15 meter geïnstalleerd kunnen worden (Figuur 3.11). Omdat de vlieger op de heen- en terugweg op een andere hoogte vliegt is de totale hoogte van de waterkolom waar hij doorheen gaat ongeveer 20 meter. Een dergelijke installatie heeft volgens *Getijdenenergie 1* een vermogen van 500 kW.

In een getijdenpark, waar meerdere apparaten opgesteld zijn, liggen deze in rijen loodrecht op de stroomrichting (Figuur 3.12). De apparaten liggen ongeveer 125 meter uit elkaar zodat ze vrij kunnen roteren. Een volgende rij apparaten kan op ongeveer 500m afstand van de eerste liggen. Een opstelling van 10 apparaten samen met een vermogen van 5 MW levert volgens *Getijdenenergie 1* ongeveer 18,5 GWh per jaar aan elektriciteit. Dit komt overeen met 3700 vollasturen, gelijk aan wat er in de SDE++ aangenomen wordt voor getijdenenergie (Lensink & Schoots, 2023).



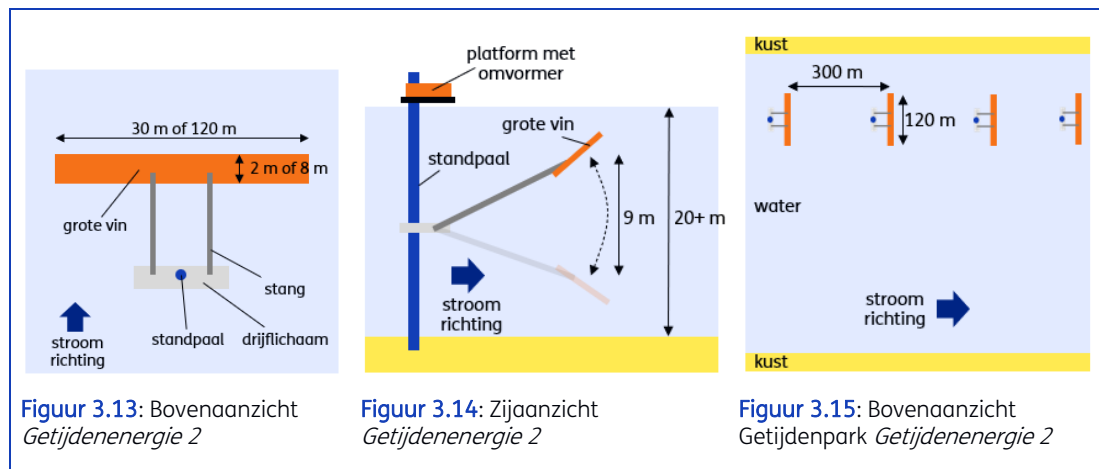
3.2.1.2 *Getijdenenergie 2*

De technologie van *Getijdenenergie 2* berust op een grote vin die op en neer beweegt door de kracht van stromend water. Deze beweging wordt middels een omvormer omgezet in elektriciteit.

In het bovenaanzicht is te zien dat er aan een standpaal een drijflichaam is bevestigd (Figuur 3.13). Aan dit drijflichaam zitten twee stangen die een grote vin vasthouden. De grote versie van het apparaat, het zeemodel, heeft een grote vin van 120 bij 8 meter. Het kleinere riviermodel heeft een grote vin van 30 bij 2 meter. In het geval van het zeemodel beweegt de vin op en neer over een hoogte van ongeveer 9 meter en maakt ongeveer 0,75 omwentelingen per minuut (Figuur 3.14). Het apparaat dient geïnstalleerd worden bij dieptes groter dan 20 meter. Het riviermodel van *Getijdenenergie 2* heeft volgens *Getijdenenergie 2* een piekvermogen van ongeveer 51 kW.

In een getijdenpark zouden meerdere apparaten achter elkaar neergezet kunnen worden (Figuur 3.15). *Getijdenenergie 2* verwacht dat na 300 meter de waterstroming weer laminair is, waarna dus een nieuw apparaat geplaatst kan worden. Een installatie van 100 *Getijdenenergie 2s* (riviermodel) met een totaal vermogen van ongeveer 5 MW levert volgens eigen inschattingen van *Getijdenenergie 2* ongeveer 9-17 GWh/jaar aan elektriciteit. Deze inschatting past bij typische theoretische inschattingen van vollasturen voor getijdenenergie (2000-3500) (Lamboos & van der Brink, 2021). Gezien de status van

ontwikkeling van *Getijdenenergie 2* is het nog onzeker hoeveel de installatie in de praktijk zal opwekken.



Figuur 3.13: Bovenaanzicht *Getijdenenergie 2*

Figuur 3.14: Zijaanzicht *Getijdenenergie 2*

Figuur 3.15: Bovenaanzicht *Getijdenpark Getijdenenergie 2*

3.2.1.3 Vergelijk ontwerpen getijdenenergie

In **Tabel 3.3** wordt ook de benodigde ruimte, exclusief eventuele veiligheidszones rondom de getijdenparken, aangegeven. De benodigde ruimte is een gevolg van de opstelling en de benodigde ruimte tussen de apparaten opgegeven door de ontwikkelaars. Net als bij golfenergie is dit erg afhankelijk van de aannames en kan dit nog veel verschillen per locatie. De inschattingen kunnen ook nog veel veranderen bij nieuwe inzichten over de benodigde afstand tussen apparaten en de benodigde veiligheidszones.

Tabel 3.3: Vergelijk getijdenpark van 5 MW van de verschillende ontwikkelaars. ¹ De aangegeven oppervlakte is sterk afhankelijk van de opstelling. Bij een enkele rij wordt alleen de ruimte die het apparaat zelf inneemt meegenomen. Bij meerdere rijen wordt ook de ruimte tussen de rijen van apparaten (tot wel 500 meter) opgeteld bij de benodigde ruimte voor de opstelling.

Ontwikkelaar	Aantal apparaten	Elektriciteitsproductie [GWh per jaar]	Vollasturen	Ruimte [hectare] ¹
<i>Getijdenenergie 1</i>	10	18,5	3700	24-56
<i>Getijdenenergie 2</i>	100	9-17	1760	Nog niet bekend

3.2.2 Opschaling van de techniek

Getijdenenergie 1 is een schaalmodel in het Waddengebied bij Ameland aan het testen (TRL 6) en is een volledige schaal test (TRL 7) aan het voorbereiden. Ze verwachten de tests in 2026 afgerond te hebben. Vervolgstappen zijn naar verwachting een (demonstratie)project met meerdere apparaten in een array. Daarna volgt commerciële uitrol, naar verwachting van *Getijdenenergie 1* al voor 2030.

Getijdenenergie 2 zit momenteel op lage TRL en er is nog veel ontwikkeling te gaan. Er zijn nog geen tijdspaden in te schatten.

3.2.3 Infrastructuur en netinpassing

Getijdenenergie 1 beoogt directe invoeding van elektriciteit via elektriciteitskabels naar de Waddeneilanden of het vasteland. De PTO van het *Getijdenenergie 1* systeem transformeert de geproduceerde elektriciteit naar 10 kV, waarmee het direct in te voeden is op het middenspanningsnet. Batterijopslag kan toegepast worden om grotere projecten in te passen.

3.2.4 Ecologische en andere maatschappelijke effecten

Er vindt al onderzoek plaats, deels ook afgerond in het kader van reeds verleende vergunningen voor de pilot installatie van *Getijdenenergie 1*⁵, op basis waarvan ‘geen negatieve invloed op de ecologie’ is vastgesteld. Aangroei van vegetatie is prima mogelijk, en belangrijke ontwerpaspecten zijn de energie efficiëntie, het gebruik van grondstoffen en recyclebaarheid. Het beperken van de ecologische impact is een aandachtspunt in het hele proces. Lokaal kan er een invloed zijn op de zeebodem door stroming rondom de installatie, bodemerosie. Mogelijk is er een effect op de grotere zandbeweging rondom de installatie, maar dat is naar verwachting niet groot.

3.2.5 Kosten en opbrengsten

Ook voor getijdenenergie is in het TNO-onderzoek naar energie uit water voor de verkenning elektriciteit uit water (Lamboog & van der Brink, 2021) op basis van literatuur een overzicht gemaakt van de kosten. Deze informatie is vervolgens getoetst bij marktpartijen. **Tabel 3.4** geeft een overzicht van de investeringskosten, operationele kosten en de gemiddelde kostprijs per geproduceerde kilowattuur uit het rapport.

De lage kosten voor 2020 zijn gebaseerd op het PBL-advies voor de SDE++ 2020 (Lensink, Eindadvies basisbedragen SDE++ 2020, 2020). De SDE++ gaat uit van een projectgrootte van 1,5 MW voor getijdenenergie. Witteveen+Bos en CE Delft berekenden op basis van de SDE++ cijfers een lagere LCOE uit van 0,16 €/kWh (van Druten & Kruit, 2019). Het advies voor de SDE++ 2023 neemt een kostenstijging mee van materialen, energie en arbeid van 10% op zowel de investeringskosten als de vaste operationele kosten (Lensink & Schoots, 2023). Het geadviseerde basisbedrag voor de SDE++ 2023 is 0,2391 €/kWh, ruim 30% hoger dan het advies voor de SDE++ 2020.

De midden en hoge kosten voor 2020 in **Tabel 3.4** zijn gebaseerd op een inventarisatie van internationale industriedata en literatuur door Hoefnagels (2020) voor een horizontale as getijdenturbine (het vaakst voorkomende ontwerp voor getijdenenergie uit stroming). De lage kant van de bandbreedte van Hoefnagels (2020) ligt boven de getallen van de SDE++, wat aangeeft dat de getallen waar de SDE++-adviezen op gebaseerd zijn laag zijn vergeleken met andere internationale inschattingen van de huidige kosten van getijdenenergie.

De kosten voor 2030 zijn gebaseerd op schattingen van het JRC over hoeveel de kosten dalen bij een stijging van het wereldwijd geïnstalleerde vermogen.⁶ Net als voor golfenergie geeft de brede bandbreedte in de kosteninschattingen voor getijdenenergie de onzekerheid weer over de huidige kosten en de kostenontwikkeling richting 2030.

⁵ Door Buro Bakker. Wij hebben dit onderzoek niet ingezien.

⁶ Ook wel bekend als leercurves.

Tabel 3.4: Inschatting LCOE getijdenenergie stroming in 2020 en 2030 op basis van geanalyseerde literatuur en berekeningen (Lamboos & van der Brink, 2021).

Kosten	2020			2030		
	Laag	Midden	Hoog	Laag	Midden	Hoog
Investeringskosten (€/kW)	5100	7500	9750	2320	5900	6440
Vaste operationele kosten (€/kW/jaar)	155	400	625	130	330	361
LCOE (€/kWh)	0,185	0,65	1,63	0,10	0,25	0,27

Getijdenenergie 1 heeft voor zowel het vorige onderzoek als dit onderzoek aangegeven dat de kosten vergelijkbaar zijn voor de onderwatervlieger als voor horizontale as getijdeturbinen. Huidige kosten zijn onduidelijk. Specifieke kosteninschattingen voor een 10 MW systeem vallen in de bandbreedte laag-midden voor 2030 in [Tabel 3.4](#). *Getijdenenergie 1* ziet nog mogelijkheden om te optimaliseren aan de hand van de berekeningen van de SDE++ en denkt voor 10 MW systemen dus ook uit te komen in de buurt van de inschattingen van de SDE++ adviezen (0,166 €/kWh). Om 10 MW te installeren zijn 20 *Getijdenenergie 1* vliegers nodig. Van belang voor de kostendaling zijn dus opschaling van het projectformaat naar 20 *Getijdenenergie 1* vliegers in één project. De kosteninschatting van *Getijdenenergie 1* kent nog wat onzekerheid.

Voor *Getijdenenergie 2* is nog geen kosteninformatie beschikbaar.

Ook voor getijdenenergie verwachten we dat er voor eerste projecten subsidies in de vorm van investeringssubsidies (bv. DEI+ of regionale subsidies zoals die van het Waddenfonds) en operationele subsidies (bv. SDE++) nodig zullen zijn voor getijdenenergieprojecten. Of er op langere termijn (2030 of daarna) ook (operationele) subsidies nodig zijn is afhankelijk van de ontwikkeling van de kostprijs van getijdenenergie (zie ook hierboven) en de ontwikkeling van de opbrengsten.

Ook bij getijdenenergieprojecten kan de elektriciteit verkocht worden via stroomafnameovereenkomsten of via de elektriciteitsmarkt. Net als voor golfenergie geldt dat getijdenprojecten ook stroom produceren wanneer het niet waait en de zon niet schijnt. Hierdoor wordt verwacht dat de opbrengsten van de verkoop van elektriciteit op de elektriciteitsmarkt gemiddeld hoger zijn dan voor zonne- en windenergieprojecten (EVOLVE, 2023). Ook deze projecten kunnen daardoor relatief sneller rendabel worden. Ook hier is nadere uitwerking voor de beoogde projecten in het Waddengebied nog nodig.

3.3 Energie uit verschil in zoutgehalte van twee waterlichamen

3.3.1 Werking van de techniek

Bij deze techniek wordt er energie gewonnen uit het verschil in zoutgehalte van twee waterlichamen. Doorgaans wordt er zoet rivierwater en zout zeewater gebruikt, maar (industrieel) afvalwater met een hoog zoutgehalte kan ook gebruikt worden, zoals pekkel. Er zijn twee kansrijke varianten: Reverse Electro-Dialysis (RED) en Pressure Retarded Osmosis (PRO). Bij RED laten twee soorten ion-selectieve membranen afwisselend positief en negatief geladen ionen door waardoor er een kleine spanning ontstaat. Door meerdere membranen in serie achter elkaar te zetten ontstaat een spanningsverschil dat omgezet kan worden in elektriciteit. Bij PRO laat een membraan water door, maar geen opgelost zout. Doordat water van nature van de zoete naar de zoute kant wil stromen ontstaat er een drukverschil waarmee elektriciteit opgewekt kan worden via een turbine. Het huidige TRL-niveau van zowel RED als PRO wordt ingeschat op 7. De ontwikkelaar opereert sinds 2014 een prototype van 50 kW op de Afsluitdijk (van Druten & Kruit, 2019). Momenteel werkt de ontwikkelaar actief aan een opschaling van dit systeem op de Afsluitdijk om zo de laatste stap te zetten naar grote installaties met eindgebruikers in een commercieel traject.

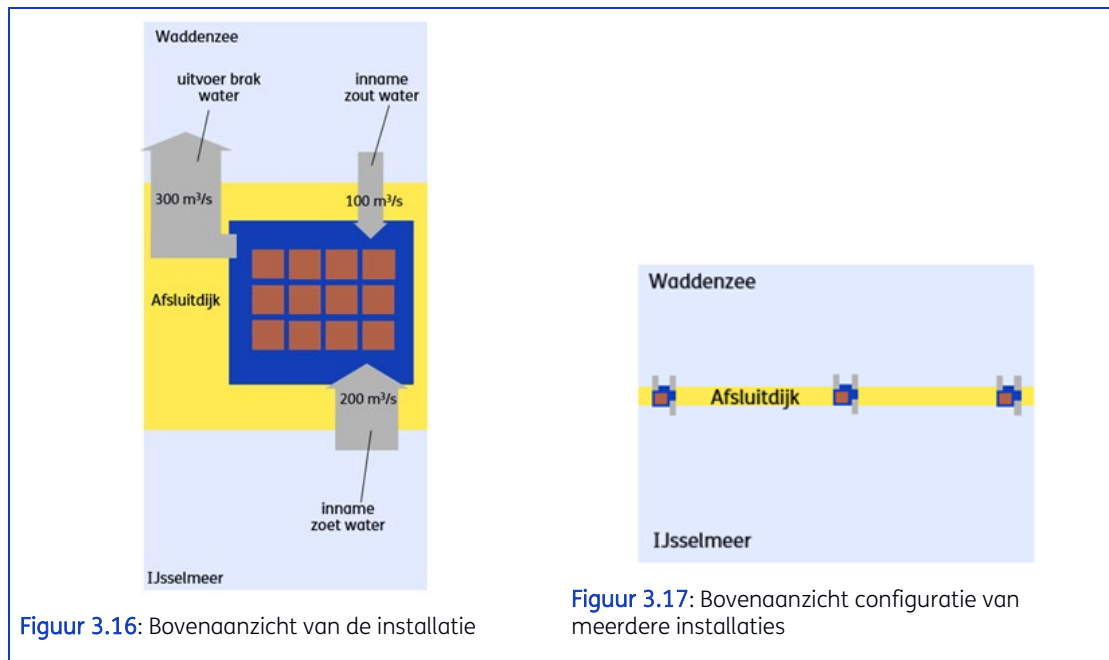
De elektriciteitsproductie is direct gerelateerd aan de beschikbare hoeveelheid water, en het zoutgehalte en de temperatuur van dit water. Het profiel van elektriciteitsproductie is daarmee ook erg stabiel, zonder grote verschillen van dag tot dag. In het geval van een installatie op de Afsluitdijk zal het opgewekte vermogen in de zomer en herfst iets hoger zijn dan gedurende de winter en de lente. Dit is ten eerste het gevolg van een lagere watertemperatuur in de winter en lente. Ten tweede is de saliniteit van de Waddenzee in de winter en lente lager door de afvoer van regen- en smeltwater vanuit het stroomgebied van de IJssel.

Nu zal kort worden ingegaan op de beoogde installatie van de ontwikkelaar in het Waddengebied.

3.3.1.1 De beoogde installatie voor energie uit het verschil in zoutgehalte tussen het IJsselmeer en de Waddenzee

De toekomstig beoogde commerciële installatie van de ontwikkelaar heeft een inname capaciteit van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aan zout water uit de Waddenzee en $200 \text{ m}^3/\text{s}$ aan zoet water uit het IJsselmeer (Figuur 3.16). Er wordt $300 \text{ m}^3/\text{s}$ aan brak water terug de Waddenzee in gebracht. De uitvoer van brak water gebeurt op een afstand zodat de saliniteit van het ingenomen zoute water niet wordt beïnvloed. Deze installatie heeft een verwacht gemiddeld jaarlijks vermogen van 67 MW, variërend van 60 MW in de wintermaanden en 75 MW in de zomermaanden. Het piekvermogen is 100 MW. De ontwikkelaar verwacht dat de installatie ongeveer 450 GWh aan elektriciteit per jaar levert.

Momenteel stroomt er gemiddeld $450 \text{ m}^3/\text{s}$ van het IJsselmeer naar de Waddenzee. Deze installatie behoeft dus bij piekproductie iets minder dan de helft van het totale zoete water dat langs de Afsluitdijk stroomt. In een gerealiseerde opstelling zal niet alle inname en uitvoer van het water op één plek gebeuren maar zal deze verspreid worden over verschillende plekken op de Afsluitdijk (Figuur 3.17). Het zal natuurlijk nog steeds mogelijk blijven om over de Afsluitdijk te rijden of te fietsen.



Figuur 3.16: Bovenaanzicht van de installatie

Figuur 3.17: Bovenaanzicht configuratie van meerdere installaties

3.3.2 Opschaling van de techniek

Sinds 2014 opereert de ontwikkelaar een pilot installatie op de Afsluitdijk. Huidige TRL is daarmee 7. Recent is er door het Waddenfonds een nieuwe subsidie toegewezen voor een nieuwe demonstratie installatie (Waddenfonds, 2023). Voor de nieuwe installatie worden de membranen en stacks opgeschaald naar volledige industriële schaal en wordt er onderzoek gedaan naar de impact op en mogelijk toegevoegde waarde voor de omgeving en ecologie. Na deze stap verwacht de ontwikkelaar commercieel de techniek uit te kunnen rollen.

3.3.3 Infrastructuur en netinpassing

Om de opgewekte elektriciteit van de installatie het net op te krijgen zijn er enkele omvormers en transformatoren nodig. De opgewekte stroom kan direct aangeboden worden bij een onderstation van de netbeheerder. De ontwikkelaar geeft aan een bestaande terugleverovereenkomst te hebben met de netwerkbeheerder die ook voorziet in de beoogde omvang na opschaling.

3.3.4 Ecologische en andere maatschappelijke effecten

Ecologische impact van de 100 MW installatie is naar verwachting van de ontwikkelaar zeer beperkt, wat volgt uit een analyse door Deltares en NIOZ (Herman, et al., 2020). Het streven is om de toekomstige projecten een positieve ecologische impact te laten geven.

Voorbeelden: aangroei van organismen die de voedselketen verrijken, kraamkamer voor juveniele vis, natuurlijke filtratie, luwtegebied voor vogels. Op de huidige locatie heeft de installatie mogelijk meerwaarde als lokstroom voor vis. Ook is bijvoorbeeld een positieve invloed op de waterveiligheid te verwachten. Aandachtspunt in het ontwerp is het voorkomen van instroom van organismen bij de inname van zout water, wat reeds aangetoond is in de praktijk. Er worden geen chemicaliën gebruikt in het proces die naar de omgeving kunnen stromen. Aandachtspunt is nog wel dat fyto- en zoö-plankton door de waterinnameroosters komen, waarbij sterfte kan optreden als deze in contact komen met het zoute terugspoelwater. Dat is bij de proefinstallatie van de ontwikkelaar al onderzocht (Herman, et al., 2020) en wordt op dit moment verder uitgezocht. Volgens de ontwikkelaar

kan gesteld worden dat de vergunningverlening probleemloos lijkt, en een installatie op grotere schaal een positieve bijdrage levert aan de spucapaciteit. Materiaalgebruik is milieuvriendelijk. Maatschappelijke baten liggen in stabiliteit van de elektriciteitsopwekking bij afwezigheid van overlast en milieubelasting, met mogelijk positieve effecten voor het milieu.

3.3.5 Kosten en opbrengsten

Tabel 3.5 geeft een inschatting van de kosten van een 1 MW demo-installatie voor energie uit het verschil in zoutgehalte van twee waterlichamen op basis van het recente advies voor de SDE++ 2023. In vorige rapporten is er een kostprijs van 0,41 €/kWh gedeeld op basis van het advies voor de SDE++ 2019 (van Druten & Kruit, 2019) (Lamboos & van der Brink, 2021). De stijging in kostprijs komt alleen door een stijging in de financieringsparameters in recentere adviezen voor de SDE++. De inschattingen voor de investeringskosten en operationele kosten zijn niet aangepast sinds de SDE++ 2019.

Tabel 3.5: Kosteninschatting voor een 1 MW installatie van energie uit verschil in zoutgehalte van twee waterlichamen uit het advies voor de SDE++ 2023 (Lensink & Schoots, 2023).

Parameter	Waarde
Installatiegrootte (MW)	1
Vollasturen	8000
Investeringskosten (€/kW)	37000
Vaste operationele kosten (€/kW/jaar)	213
Basisbedrag (€/kWh)	0,63
Looptijd subsidie	15

Door de fabrikant wordt een kostprijs van 0,10-0,15 €/kWh verwacht op basis van meerdere studies, waarbij 0,10 €/kWh geldt voor centrales groter dan 50 MW (Lamboos & van der Brink, 2021) (van Druten & Kruit, 2019). Dit beeld is tijdens het interview voor dit onderzoek nogmaals bevestigd.

De membranen zijn een belangrijk onderdeel van de kosten en hebben een grote invloed op mogelijke kostendalingen. Daarnaast zijn van belang het formaat van een installatie, het totale geïnstalleerde vermogen en de vollasturen. Een langere levensduur zal de kosten per kilowattuur ook verlagen. De kosten van een grotere installatie bij de Afsluitdijk zijn dus afhankelijk van het ontwerp van de installatie. Omdat er nog geen ontwerp is, is het onduidelijk wat de kosten ervan zullen zijn.

Net als bij golf- en getijdenenergie is het de verwachting dat de gemiddelde opbrengsten van de verkoop van elektriciteit op de elektriciteitsmarkt voor de ontwikkelaar hoger zullen zijn dan gemiddelde opbrengsten voor zonne- en windenergieprojecten. Nadere uitwerking is nog nodig. Ook voor de ontwikkelaar gelden stroomafnameovereenkomsten als een alternatief waarmee de opbrengsten van de verkoop van elektriciteit gegarandeerd kunnen worden.

4 Technische inpassing

In dit hoofdstuk behandelen we eerst het theoretische potentieel in Nederland van elk van de technieken. Vervolgens geven we een overzicht van het gehele Waddengebied met alle aangegeven zoekgebieden en het ingeschatte potentieel van de ontwikkelaars. Vervolgens kijken we in meer detail naar de zoekgebieden en het potentieel waarvan wij inschatten dat het realiseerbaar is in 2030.

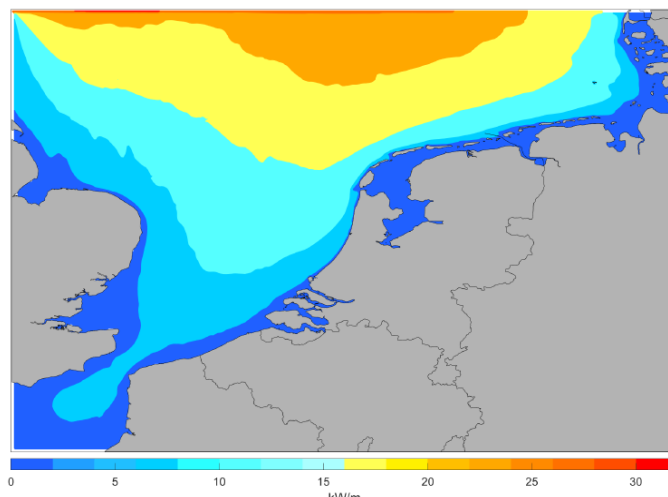
4.1 Potentieel van technieken

4.1.1 Golfenergie

Het potentieel van golfenergie is afhankelijk van de hoogte, de richting en de frequentie van golven (Lavidas, 2020). Samen worden deze uitgedrukt in de gemiddelde energie van de golven, in kW/m. Voor het Waddengebied ligt het grootste potentieel ten noordwesten van de Waddeneilanden (zie [Figuur 4.1](#)). De energie in de golven in deze regio loopt uiteen van ongeveer 5 - 15 kW/m. Iets verder ten noorden van de Waddeneilanden loopt de gemiddelde golfenergie op tot 20 kW/m.

De getoonde waarden betreffen een jaarlijks gemiddelde, maar er zijn significante verschillen tussen de seizoenen (Lavidas & Gonzalez Alday, 2022). In de zomer (juni-augustus) zit het potentieel tussen de 5 - 10 kW/m terwijl het potentieel in de winter (december-februari) ongeveer 25 - 30 kW/m is. Een lijn vanaf Alkmaar tot Schiermonnikoog op een afstand van ongeveer 8 km uit de kust is ongeveer 200 km lang. Deze lijn langs het Waddengebied bevat dus ongeveer 1 - 3 GW aan golfenergie.

Om de meeste energie uit de golven te kunnen halen is het van belang de golfenergieconverters te dimensioneren op basis van het golfregime (hoogtes, frequenties en richtingen) op de beoogde locatie. Wat er uiteindelijk aan golfenergie gewonnen kan worden hangt af van de onderlinge afstand tussen de golfenergieconverters, het aantal lijnen van golfenergieconverters die achter elkaar geplaatst worden en de invloed van lijnen op elkaar.

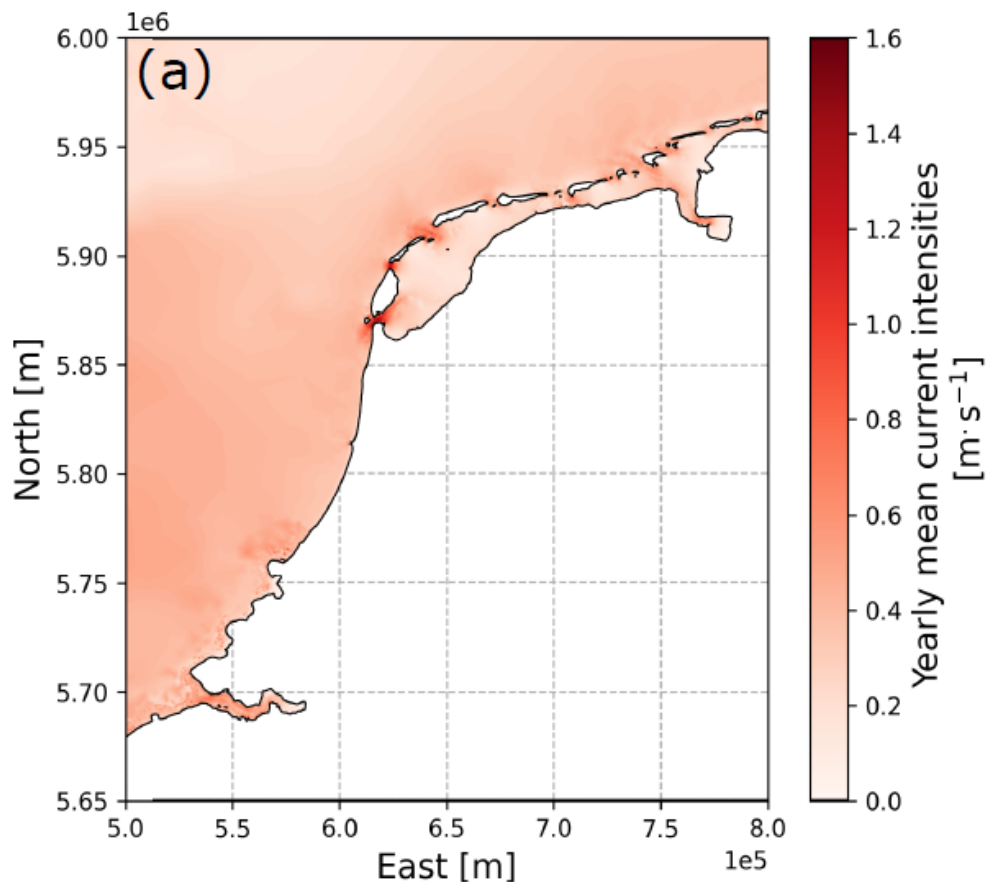


Figuur 4.1: Gemiddelde golfsterkte gemeten over 1980-2020 (Lavidas & Gonzalez Alday, 2022)

4.1.2 Getijdenenergie

Het potentieel van getijdenenergie is afhankelijk van de snelheid van de stroming veroorzaakt door het getij. De hoogte en stromingssnelheden van het getij zijn afhankelijk van de beweging van de aarde, de maan en de zon waardoor getijdenenergie een goed voorspelbare bron van energie is. Stroomsnelheden nemen toe op locaties waar vernauwingen optreden, zoals tussen de Waddeneilanden. De meest optimale locaties voor getijdenenergie in het Waddengebied zijn (zie ook [Figuur 4.2](#)):

1. Tussen Den Helder en Texel (Marsdiep)
2. Tussen Texel en Vlieland (Engelschmangat)
3. Tussen Vlieland en Terschelling (Vliestroom)
4. Tussen Terschelling en Ameland (Borndiep)
5. In de Eems



Figuur 4.2: Jaarlijks gemiddelde stroomsnelheden in de Wadden- en Noordzee (Gonzalez Alday & Lavidas, 2022).

Het winbaar potentieel in het Engelschmangat is echter beperkt doordat het er ondiep is (< 10 m) (Gonzalez Alday & Lavidas, 2022). In eerdere studies zoals door Witteveen+Bos en CE Delft, wordt het potentieel in de Waddenzee ingeschat op maximaal 10 MW (alleen het Marsdiep) door beperkingen in stroomsnelheid en diepte (van Druten & Kruit, 2019). De onderwatervlieger van *Getijdenenergie 1* is echter geschikt voor lage stroomsnelheden en ondiepe wateren. Hierdoor verwacht *Getijdenenergie 1* ook in de Vliestroom, het Borndiep en de Eems installaties te kunnen plaatsen. *Getijdenenergie 1* schat zelf het potentieel in de Waddenzee in op 40 MW.

4.1.3 Energie uit het verschil in zoutgehalte van twee waterlichamen

Deze techniek heeft potentieel waar zoet en zout water bij elkaar komen. In het Waddengebied is dat met name waar het IJsselmeer en de Waddenzee samenkomen. De locaties met een groot potentieel liggen daarmee op of nabij de Afsluitdijk.

Het potentieel wordt met name bepaald door de hoeveelheid zoet water dat beschikbaar is en hoeveel brak water er (zonder negatieve invloed op het ecosysteem) de Waddenzee in kan stromen. De ontwikkelaar verwacht dat er 100 MW geïnstalleerd kan worden op basis van een studie door Deltares⁷ naar het maximale niet-schadelijke debiet voor de Waddenzee.

De beschikbaarheid van zoet water wordt bepaald door de afvoer van zoet water de Waddenzee in. Voor 100 MW productie is er zo'n 200 m³/s aan zoet water nodig. Gemiddeld stroomt er zo'n 450 m³/s zoet water van het IJsselmeer de Waddenzee in. Op het eerste gezicht lijkt er dus voldoende aanvoer van zoet water voor een 100 MW installatie. Echter, de hoeveelheid waterafvoer is verschillend per seizoen. In de zomer wordt er minder dan 200 m³/s afgevoerd (van Druten & Kruit, 2019). Dat betekent dat een 100 MW installatie in de zomer afgeschaald moet worden. Dit is zichtbaar in de inschatting van de ontwikkelaar dat de installatie gemiddeld 67 MW produceert (zie paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**), waar ook wisselingen in zoutgehalte in de Waddenzee in meegenomen zijn. In de SDE++ en eerdere studies is aangenomen dat een installatie 8000 vollasturen per jaar maakt (Lensink & Schoots, 2023) (Lamboos & van der Brink, 2021) (van Druten & Kruit, 2019). De ontwikkelaar verwacht dat er 450 GWh elektriciteit per jaar geproduceerd wordt, wat neerkomt op 4500 vollasturen. Er lijkt dus voldoende afvoer van zoet water te zijn voor de door de ontwikkelaar beoogde installatie van 100 MW, maar de verwachte elektriciteitsproductie is lager dan ingeschat is in voorgaande studies.

4.2 Vergunningen, netinpassing en ecologie

4.2.1 Vergunningen

Uit de inbreng van de marktpartijen komt al naar voren dat de vergunningverlening een belangrijk onderwerp is voor de uitrol van golf- en getijdenenergie, en dat daarvoor diverse uitdagingen liggen. Voor energie uit het verschil in zoutgehalte is de situatie minder complex, enerzijds vanwege de beoogde locatie aan de Afsluitdijk, anderzijds vanwege de lange periode dat er op deze locatie al onderzoek plaatsvindt. In deze paragraaf worden aspecten rond de vergunningverlening geadresseerd, waarbij tevens eventuele onzekerheden benoemd worden. Deze paragraaf is gebaseerd op de marktinbreng enerzijds en een uitwisseling met Rijkswaterstaat anderzijds.

Natura 2000

Een belangrijke factor met betrekking tot de vergunningen betreft het Europees netwerk van beschermde natuurgebieden, die vallen onder de noemer Natura 2000. In deze gebieden worden bepaalde dieren, planten en hun natuurlijke leefomgeving beschermd om de biodiversiteit te behouden. In 1979 is de Vogelrichtlijn opgesteld en in 1992 de Habitatrichtlijn. Deze richtlijnen bestaan uit twee delen: soortenbescherming en gebiedsbescherming. De onder beide richtlijnen aangewezen beschermde gebieden vormen

⁷Wij hebben dit onderzoek niet ingezien.

het Natura 2000 netwerk. De complete Waddenzee en de zee tot drie zeemijl (ongeveer 5,5 km) buiten de kust van de Waddeneilanden zijn Natura 2000 gebieden (Natura 2000, 2023). Activiteiten ontplooiën binnen een Natura 2000 gebied is lastig. Uit de reeds vergunde pilotprojecten en het in dat kader uitgevoerde onderzoek blijkt dat er geen substantiële negatieve gevolgen zijn. Ook elders in Europa worden pilotprojecten in of in de buurt van Natura 2000 gebied gerealiseerd (bijvoorbeeld de getijdenenergie testlocaties in Frankrijk nabij Bordeaux en Paimpol-Bréhat, (Seenoh, 2023) en (European Environment Agency, 2020)).

Ook als er projecten beoogd zijn (vlak) buiten een Natura 2000 gebied moet er rekening gehouden worden met eventuele implicaties voor het Natura 2000 gebied zoals effecten op de natuurwaarden.

Belemmeringen voor energie uit water

Behalve eventuele beperkingen in het kader van het Natura 2000-beheerplan voor de Waddenzee zijn er mogelijk ook andere belemmeringen. Dit is omdat er ook ruimte moet blijven voor andere activiteiten, zoals bijvoorbeeld scheepvaart, visserij, zandwinning en de ligging van kabels en leidingen. Dit maakt dat er altijd maatwerk vereist is voor het implementeren van energie uit water in en rondom de Waddenzee, waarbij alle belangen in het oog gehouden moeten worden. Over het algemeen kan gesteld worden dat toepassingen van nationaal belang voorrang krijgen op toepassingen voor energie uit water: scheepvaart, olie- en gaswinning, kabels en leidingen (aardgas en CO₂-opslag), opwekking van windenergie, zandwinning en defensie.

Combinatie met wind op zee

In de beleidsdocumenten van het Noordzeeloket wordt golfenergie altijd in combinatie met windparken op zee genoemd, bijvoorbeeld in het Programma Noordzee 2022-2027, waar de duurzame blauwe economie geïntroduceerd wordt. Deze clustering van technieken is gedreven door de wens om binnen de twaalfmijlszone niet te veel andere ruimtelijke beperkingen op te leggen, maar ook door het verwachte voordeel van een betere elektrische ontsluiting en daarmee efficiëntie winst. Dit is nog weinig concreet uitgewerkt, waardoor er voor de toekomst mogelijk nog kansen zijn.

Procedure pilotinstallatie

Voor kortdurende kleinschalige pilotprojecten voor energie uit water zijn de wettelijke vereisten gelijk aan die van grotere productie-initiatieven met een lange looptijd, namelijk een watervergunning. Bij pilots kan echter wel sprake zijn van een ander (en minder strikt) afwegingskader, waardoor deze toch gerealiseerd kunnen worden op locaties waar productie-installaties niet toegestaan zouden zijn. Daarbij zijn objecten die boven water uitsteken beleidsmatig lastiger te vergunnen dan obstakels alleen onder water. Als het project binnen twaalf zeemijl van de kust plaatsvindt is er bovendien een omgevingsvergunning nodig. Op dit moment geldt voor de grotere productie-initiatieven (waarvan de vermogensgrens niet heel duidelijk vastgesteld is) dat een combinatie met windparken op zee als verplichting geldt. Deze verplichting komt voort uit het idee om overcapaciteit op onderzeese transportkabels te benutten. Voor windparken is het gebruiken van de overcapaciteit op de kabels waarmee de trafostations zijn verbonden met het hoogspanningsnet formeel geregeld in de wet Wind op Zee, maar voor andere vormen van energie (zon-pv en getijden- en golfenergie) is dit nog niet gebeurd. Voor een deel is de vergunningverlening vooralsnog dus ook een proces op maat. Voor het verkrijgen van een vergunning is het tevens belangrijk om een ontwerp met technische tekeningen voor te leggen, dat door een daartoe gecertificeerd bureau op sterkte en integriteit is doorgerekend.

Procedure vergunningsaanvraag

Voor concepten die hun werking bewezen hebben en veilig zijn ziet de procedure rondom een vergunningsvraag in grote lijnen zo uit:

- Vooroverleg teneinde de aanvraag zo compleet mogelijk te maken. De documentatie die nodig is voor een vergunningsaanvraag is doorgaans heel uitgebreid en moet aan bepaalde voorwaarden voldoen, wat veel tijd in beslag kan nemen en het grootste deel van de doorlooptijd kan bepalen. De hierboven genoemde berekening op sterkte en integriteit bijvoorbeeld, maar ook wat de implicaties zijn van de installatie voor ander gebruik, zoals beheerplannen en natuur en milieu. Daar zijn de kaders op voorhand niet altijd helder voor.
- Bij een aanvraag die volledig en compleet is dient Rijkswaterstaat binnen 8 weken te beschikken.
- Die beschikking (vergunning) ligt vervolgens gedurende 6 weken ter visie.

Bij grote projecten duurt de gehele procedure zo'n half jaar (als de aanvrager gedegen vooronderzoek heeft gedaan).

Aanlandingskabels

De aanleg van een transportkabel voor elektriciteit is net als het plaatsen van een installatie in zee onderhevig aan de Waterwet en vereist dus ook een vergunning. Tevens is er opstalrecht voor transformatorruimte, een erfpachtovereenkomst met het Rijksvastgoedbedrijf, een vergunning wet Natuurbescherming en opstal eventuele andere grondeigenaren nodig.

4.2.2 Netinpassing

De Waddeneilanden hebben allemaal te maken met een relatief kleine netconnectie met het vasteland. Voor invoeding is er in alle gevallen nu geen transportcapaciteit meer beschikbaar. Op land, in de Waddenzee, op de Waddeneilanden en een stukje uit de kust van de Waddeneilanden is Liander verantwoordelijk voor aansluiting. Verder offshore is TenneT verantwoordelijk. De exacte grens tussen deze verantwoordelijkheidsgebieden is niet geheel duidelijk.

Volgens de huidige regelgeving is de netbeheerder verplicht om alle aanvragen in volgorde van binnenkomst te behandelen. Naar verwachting zal er de komende jaren maar beperkt vrije capaciteit op de Waddeneilanden komen (zie [Tabel 4.1](#)) en dan staan er naar verwachting al veel partijen in de rij. Een alternatief organisatorisch traject voor een nieuw te leggen onderzeese kabel tussen de Waddeneilanden en het vasteland zou mogelijk kunnen zijn, maar daarvoor zouden onderlinge afspraken met de netbeheerder, gemeentes en de provincie nodig zijn. Maar dan nog is de doorlooptijd naar schatting zo'n 7 tot 10 jaar voor een nieuwe onderzeese transportkabel voor elektriciteit. Alleen al het ecologisch (laten) toetsen om een kabel in de Waddenzee te leggen kent een doorlooptijd van circa 4 jaar.

Een complicatie die met name speelt bij pilotprojecten is dat de netinfrastructuur voor 40 jaar aangelegd wordt, terwijl de installatie zich nog niet bewezen heeft. Het langzaam mee laten groeien van de transportcapaciteit (een kabel van lagere capaciteit voor een pilot over hetzelfde tracé uitbreiden met hogere capaciteit kabels naar de latere productie-installatie) is eventueel wel een optie.

Tabel 4.1: Huidige beschikbare netcapaciteit voor invoeding in het Waddengebied. Bron: PDOK reviewer, geen analyse door TNO. (PDOK, 2023)

OS Naam	Verzorgingsgebied	Beschikbare capaciteit voor invoeding (MW)			
		Nu	Over 3 jaar	Over 5 jaar	Over 10 jaar
Warmenhuizen	Schoorl, Warmenhuizen, Petten	0	0	0	<2
Schagen	Schagen, Sint Maarten, Dirkshoorn	0	0	0	<2
Anna Paulowna	Julianadorp, Anna Paulowna, Callantssoog	<2	<2	<2	<2
Den Helder de Schooten	Den Helder Zuid	0	0	0	<2
Den Helder Vogelwijk	Den Helder Noord	<2	<2	<2	<2
Texel	Texel, West-Vlieland	<2	<2	<2	<2
Herbajum	Herbajum, Harlingen, Oost-Vlieland, Terschelling	0	0	0	<2
Dokkum	Dokkum, Ameland, Schiermonnikoog	0	<2	<2	81
Winsum Ranum	Winsum, Ulrum	0	0	0	0
Eemshaven Midden	Uithuizen, West-Eemshaven, Rottummerplaat	0	0	0	112
Eemshaven Oost	Oost-Eemshaven, Bierum	0	0	0	59

Het potentieel voor EuW en de ambitie van EuW-ontwikkelaars is vele malen groter dan de transportcapaciteit die er op dit moment ligt richting de eilanden. Er zou bovendien veel ruimte gereserveerd moeten worden voor de aanlanding en de transformatorstations. Nieuwe kleinere transportkabels van enkele MW zouden eventueel wel mogelijk moeten zijn in de periode tot 2030, maar daarmee kan slechts een beperkt deel van bovengenoemd EuW-potentieel aangesloten worden. Het lokaal inzetten van de beschikbare elektriciteit zou wel een mogelijke route zijn om méér energie uit EuW te oogsten, bijvoorbeeld voor grootschalige conversie naar hernieuwbare gassen of naar hernieuwbare warmte. Onder de huidige regelgeving moeten ook de aansluitingen voor grootschalige elektrische batterijen in volgorde van aanmelding behandeld worden, waardoor het lastig is om synergie en optimalisatie rondom congestie management te bewerkstelligen. De goede voorspelbaarheid van de elektriciteitsopbrengst uit EuW gedurende het jaar en gedurende de dag is een pluspunt voor de inpassing voor de netbeheerder, maar die mag dit dus niet meenemen in de prioritering van projecten. Ook kan er nog geen rekeningen mee gehouden worden bij de uitrol van extra kabels naar de Waddeneilanden. Er wordt landelijk gekeken naar aanpassingen in de regelgeving zodat netbeheerders meer factoren kunnen meenemen voor afwegingen over toegang tot het elektriciteitssysteem.⁸

Als er de komende jaren meer ruimte vrijkomt op het net op de Waddeneilanden voor de aansluiting van EuW-projecten zal er meer potentieel ontsloten kunnen worden als de productie afgestemd is op lokaal gebruik. Om een indicatie te krijgen van het potentieel in combinatie met lokale afname en batterijopslag maken we een vergelijk met de inschatting van de elektriciteitsvraag op de Waddeneilanden uit Hoofdstuk 2. **Tabel 4.2** geeft een overzicht weer, gebaseerd op de huidige elektriciteitsvraag op de eilanden en de verwachte groei bij huishoudens en een inschatting voor het elektriciteitsverbruik van het NAM-platform op Ameland. Ook is de geplande uitbreiding van zonne-energie op Ameland met een nieuw

⁸ Zie bijvoorbeeld (Netbeheer Nederland, ACM, ministerie van EZK, ministerie van BZK, VNG, NP RES, VNO-NCW, VEMW, Energie Nederland en NVDE, 2022)

park van 3 MW meegenomen. Voor golfenergie is het ingeschatte potentieel zo'n 60-180 MW, afhankelijk van de vollasturen die aangenomen worden (respectievelijk 3000 en 1000 uur per jaar). Voor getijdenenergie komt het potentieel uit op ongeveer 50 MW, hoger dan het technische potentieel van 40 MW dat *Getijdenenergie 1* inschat (zie paragraaf 4.1.2). Bij verdere toename van de elektriciteitsvraag (bijvoorbeeld door elektrificatie van wegvervoer of ferry's) of omzetting naar warmte of hernieuwbare gassen zal het potentieel nog hoger uit kunnen vallen. Verdere toename van zonne-energie (of andere hernieuwbare elektriciteitsproductie) op de Waddeneilanden drukt het potentieel voor EuW juist.

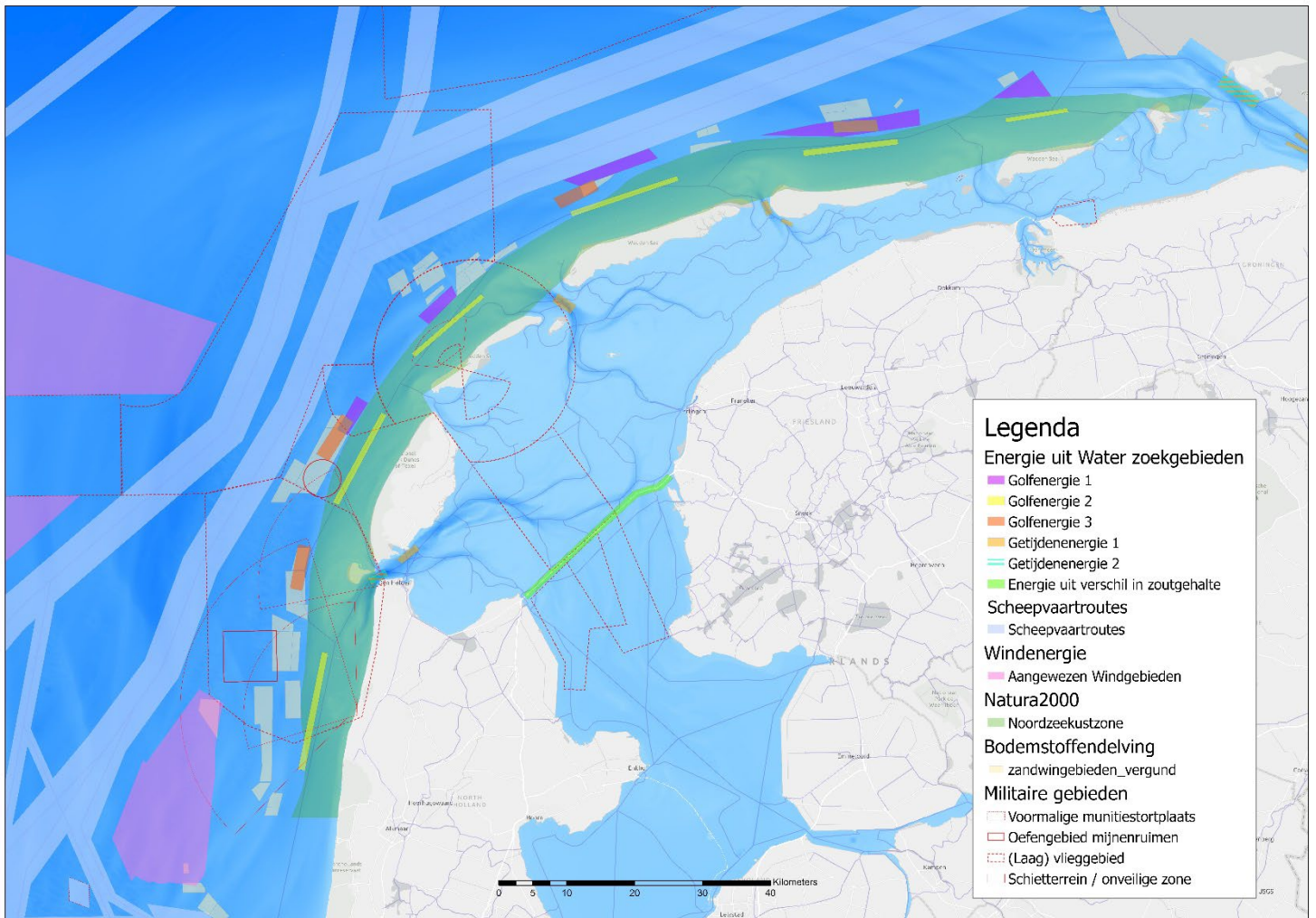
Tabel 4.2: Overzicht inschattingen potentiëlen voor de inpassing golfenergie en getijdenenergie op Waddeneilanden op basis van de lokale elektriciteitsbehoefte in 2030.

Eiland	Totaal e-verbruik 2030 [GWh]	Productie zonnestroom [GWh]	Resterende e-vraag [GWh]	Potentieel golfenergie [MW] ⁹	Potentieel getijdenenergie [MW]
Ameland	96 (incl. 70 van NAM-platform)	12 (incl. plan voor nieuw 3 MW park)	84	28-84	23
Schiermonnikoog	7	2	5	2-5	1
Terschelling	27	5	22	7-22	6
Texel	81	16	65	22-65	17
Vlieland	9	3	6	2-6	2
Totaal	219	36	181	60-181	49

4.3 Zoekgebieden

Voor dit onderzoek zijn de zes techniekontwikkelaars gevraagd naar hun beoogde zoekgebieden voor projecten in het Waddengebied. Een overzicht van de zoekgebieden is gegeven in [Figuur 4.3](#). In [Tabel 4.3](#) geven we een overzicht van de totale beoogde capaciteiten en elektriciteitsproductie per jaar per ontwikkelaar. In de opvolgende paragrafen kijken we naar verschillende kleinere gebieden binnen het zoekgebied, geven we een gebiedsomschrijving en gaan we in op de ruimtelijke aspecten, netinpassing en ecologische inpassing.

⁹ Afhankelijk van de vollasturen die aangenomen worden, hier 3000 uur bij lage kant van de bandbreedte en 1000 uur bij de hoge kant van de bandbreedte.

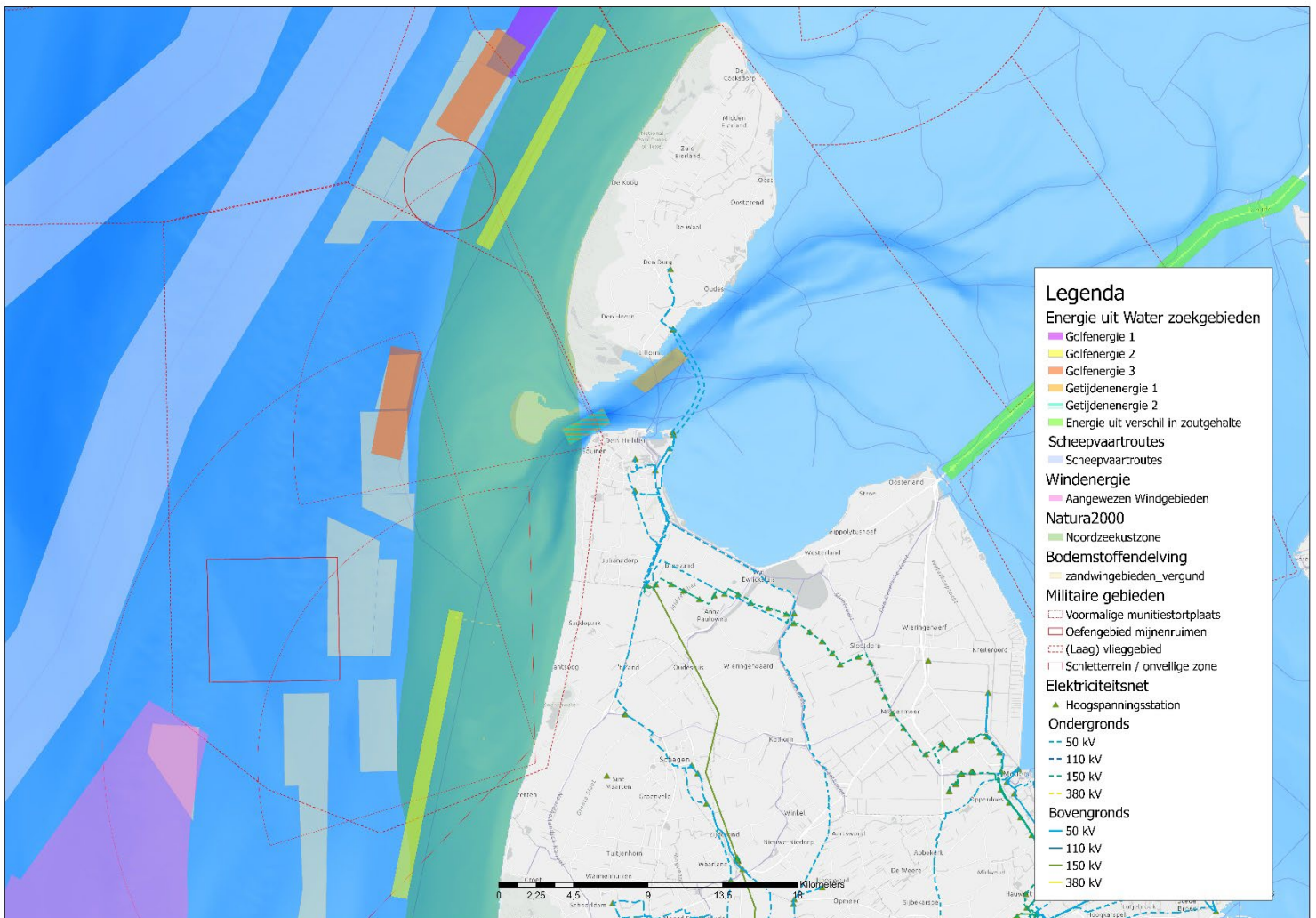


Figuur 4.3: Overzicht van zoekgebieden voor het Waddengebied.

Tabel 4.3: Overzicht beoogde totale geïnstalleerde vermogens in 2030 volgens de ontwikkelaars en plaatsing binnen het Waddengebied.

Partij	Beoogd geïnstalleerd vermogen 2030 (MW)	Verwachte productie 2030 (GWh/jaar)	Verdeling binnen Waddengebied
<i>Golfenergie 1</i>	5-30	15-90	Noordzeekustzone, niet verder gespecificeerd
<i>Golfenergie 2</i>	100	100	Noordzeekustzone, niet verder gespecificeerd
<i>Golfenergie 3</i>	50	110	Noordzeekustzone, niet verder gespecificeerd
<i>Getijdenenergie 1</i>	40	150	15 MW in het Marsdiep 5 MW in de Vliestroom 10 MW in de Borndiep 10 MW in de Eems
<i>Getijdenenergie 2</i>	5	12,4	Niet gespecificeerd
<i>Energie uit verschil in zoutgehalte</i>	100	450	Meerdere locaties langs Afsluitdijk voor delen van de installatie

4.3.1 Noord-Holland Noord en Texel



Figuur 4.4: Overzicht gebiedsgebruik Noord-Holland Noord en Texel

Gebiedsomschrijving

Het gebied voor de kust van Noord-Holland Noord en Texel is een relatief drukke plek. Er lopen vaarwegen door het Marsdiep om de haven van Den Helder en de Waddenzee te bereiken en er is vaarverkeer voor de kust van Noord-Holland langs. Verder zijn er voor de kust van Petten en Den Helder militaire gebieden gereserveerd voor schietoefeningen, zijn er meerdere laagvlieggebieden aangewezen en zijn er twee gebieden voor het oefenen van mijnenruimen. Het Natura 2000 gebied ‘de Noordzeekustzone’ loopt voor de gehele kust langs. In het zuiden reikt deze tot ongeveer 5 km uit de kust, rond Den Helder tot 10 km en voor de kust van Texel tot 8 km. Ook is er het Natura 2000 gebied ‘de Waddenzee’. Deze is niet op de kaart getekend omwille van overzichtelijkheid. Vlak buiten de Noordzeekustzone zijn ook zandwingebieden te vinden. Verder uit de kust lopen scheepvaartroutes naar de havens van Bremen en Hamburg, Noorwegen en de Oostzee. Ook ligt in het zuiden het reserveringsgebied voor het windpark Hollandse Kust-Noord.

Ruimte voor getijdenenergie

Voor getijdenenergie is het Marsdiep een interessant locatie, omdat het hier tot 40 m diep is en de stroming sterk is (oplopend tot 4 knopen). *Getijdenenergie 1* geeft twee locaties aan om potentieel te kunnen liggen. *Getijdenenergie 1* geeft ook aan dat op deze locaties genoeg ruimte is om naast vaarwegen te liggen.

Ruimte voor golfenergie

Voor golfenergie zijn voornamelijk *Golfenergie 2* en *Golfenergie 3* geïnteresseerd in deze locatie. *Golfenergie 2* heeft aangegeven in lijnen van grofweg 15 – 20 km lang voor de kust van Noord-Holland en van Texel te willen liggen. In een eerste bevraging gaven zij aan op een afstand van 5 km uit de kust te willen liggen. Echter geven zij aan ook verder uit de kust te kunnen liggen, buiten het Natura 2000 gebied ‘de Noordzeekustzone’. *Golfenergie 3* geeft aan net buiten ‘de Noordzeekustzone’ te willen liggen voor de kust van Texel en Noorderhaaks (zandplaat bij uitmonding Marsdiep) en Texel. De grote aanwezigheid van militaire oefengebieden, de vele zandwingebieden en de drukte van de beroeps- en pleziervaart zijn complicerende factoren op deze locatie om vergunningen te krijgen voor golfparken.

De meest geschikte locaties lijken te zijn: tussen het zandwingebied ten noordwesten van Texel en de vaargeul, en in de buurt van het windpark Hollandse Kust Noord.

Netinpassing

Op het gebied van netinpassing is er een hoogspanningsnet van 150 kV aanwezig in de kop van Noord-Holland om Den Helder van stroom te kunnen voorzien. Richting Texel loopt er een dubbele kabel van 50 kV waarmee Texel van stroom voorzien wordt. De capaciteit op Texel is grofweg 20 MW. Door capaciteits- en spanningsproblemen kan er tijdelijk niet voldaan worden aan nieuwe capaciteitsaanvragen voor levering en afname op het verdeelstation Texel. Verzwaring van het net op Texel zal naar verwachting gefaseerd afgerond kunnen worden in 2025-2026 (Liander, 2023). Het is goed denkbaar dat er na 2026 snel weer beperkingen zijn op het net door nieuwe aanvragen voor aansluitingen voor invoeding.

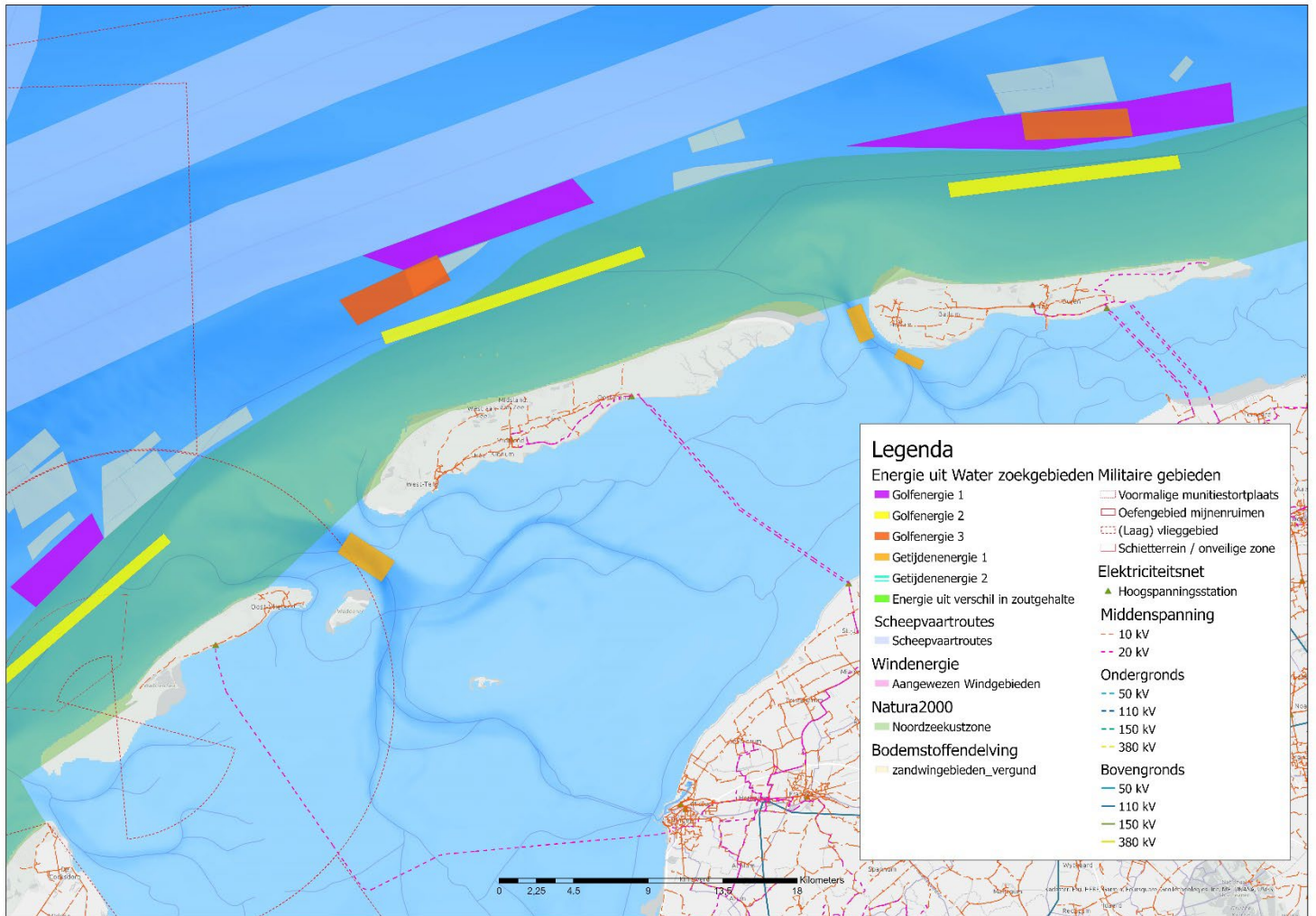
Ecologie

De zoekgebieden van *Getijdenenergie 1* liggen in het Natura 2000 gebied ‘de Waddenzee’. De zoekgebieden van *Golfenergie 2* liggen in het Natura 2000 gebied ‘de Noordzeekustzone’ en de zoekgebieden van *Golfenergie 1* en *Golfenergie 3* liggen er net buiten. Mogelijke effecten op de Natura 2000 gebieden zullen daardoor belangrijke factoren zijn in het vergunningsverleningsproces.

Inschatting realiseerbaar potentieel Noord-Holland Noord en Texel in 2030

Op basis van de huidige mogelijkheden voor netinpassing verwachten we dat het realiseerbaar potentieel voor EuW in Noord-Holland Noord en Texel in 2030 zeer beperkt is. Voor Texel verwachten we dat er op basis van de lokale elektriciteitsvraag maximaal rond de 65 GWh per jaar ingepast kan worden, in combinatie met lokale elektriciteitsopslag. De 15 MW getijdenenergie voorzien door *Getijdenenergie 1* dekt bijna deze volledige elektriciteitsvraag. Voor golfenergie komt dit overeen met 20-65 MW, afhankelijk van de verhouding tussen vermogen (MW) en productie (GWh per jaar). Er kan concurrentie ontstaan tussen golfenergie en getijdenenergie, waardoor het maximale gezamenlijke potentieel lager ligt dan de som van de twee potentiëlen. Naast ruimte op het net is vergunningverlening een beperkende factor voor 2030, omdat dit in het gebied lang kan duren door de vele andere gebruiken van de ruimte en de ligging van de zoekgebieden ten opzichte van de Natura 2000 gebieden. Tenslotte kan het tempo waarop de technieken ontwikkeld worden richting 2030 een beperkende factor zijn. Ecologische overwegingen die het realiseerbaar potentieel kunnen beperken zijn niet meegenomen in deze inschatting.

4.3.2 Vlieland, Terschelling en Ameland



Figuur 4.5: Overzicht gebiedsgebruik Vlieland, Terschelling en Ameland.

Gebiedsomschrijving

Het gebied rondom de eilanden Vlieland, Terschelling en Ameland is minder druk bezet dan het gebied rondom Noord-Holland en Texel. Er lopen vaarwegen tussen de eilanden door naar de Waddenzee en er loopt een vaarweg op ongeveer 5 km parallel aan de kust. Rond Vlieland zijn er enkele militaire gebieden gereserveerd voor schiet- en vlieg oefeningen. Ook liggen hier de meeste zandwingebieden. Met name voor de kust van Terschelling en van Ameland is er relatief veel ongebruikte ruimte in het gebied tussen de Noordzeekustzone en de scheepvaartroutes naar de Oostzee. De breedte van de Noordzeekustzone varieert tussen 4 en 8 km.

Ruimte voor getijdenenergie

Voor getijdenenergie heeft *Getijdenenergie 1* aangegeven in de Vliestroom te kunnen liggen (tussen Vlieland en Terschelling) en in het Borndiep (tussen Terschelling en Ameland). Beide locaties zijn vrij diep en kennen een sterke stroming. *Getijdenenergie 1* heeft aangegeven op beide locaties naast of aan de rand van de aanwezige vaarwegen te kunnen liggen en voorziet een potentieel van 5 MW in de Vliestroom en 10 MW in het Borndiep. De Vliestroom is redelijk druk bevaren door zowel plezier- als beroepsvaart maar is ook relatief breed. Gezien de grote hoeveelheid (zeil)schepen die door de Vliestroom naar Vlieland en

Terschelling varen kan het lastig zijn een gebied aangewezen te krijgen, ook al zouden de getijdenparken aan de rand van de vaargeulen liggen. Zeilschepen gebruiken immers vaak de totale breedte van een vaargeul. Belangrijke punten om hierbij in een vroeg stadium te behandelen is aansprakelijkheid en verzekeringen bij ongelukken. Het Borndiep is een stuk minder druk bevaart door de plezier- en beroepsvaart. Dat komt doordat het Borndiep alleen met gunstige wind bezeild kan worden en grotere schepen überhaupt de passage niet kunnen maken. De locaties liggen in het Natura 2000 gebied 'de Waddenzee'.

Ruimte voor golfenergie

Voor golfenergie hebben *Golfenergie 1*, *Golfenergie 2* en *Golfenergie 3* allen aangegeven kansrijke locaties te zien in dit gebied. Wij schatten in dat het verkrijgen van vergunningen gemakkelijker is buiten 'de Noordzeekustzone'. Dit betekent dat de zoekgebieden van *Golfenergie 2* – 3 kilometer verder uit de kust moeten liggen dan initieel aangegeven. Op het gebied van ruimtegebruik is er in dit zoekgebied mogelijkheid om meerdere tientallen MW golfenergie te installeren. De meest kansrijke locaties zijn voor de kust van Terschelling en Ameland op een afstand van 8 – 12 km.

Netinpassing

Op het gebied van netinpassing zijn de mogelijkheden per eiland verschillend. Vlieland heeft een enkele kabel van 20 kV voor een capaciteit van ongeveer 12 MW. Aangezien er geen tweede kabel is heet de situatie op Vlieland niet-redundant. Wel heeft Vlieland een noodaggregaat op het eiland. Deze situatie zorgt er voor dat storingsbedrijf een beperkende factor is voor nieuwe aansluitingen. Voor het zonnepark op Vlieland is bijvoorbeeld afgesproken dat het park wordt afgeschakeld bij storing op het net. Dit soort maatwerkafspraken zijn misschien ook mogelijk met EuW. Samen met de gemeente en klanten op het eiland zoekt Liander naar alternatieven voor het aanleggen van een extra verbinding naar het vasteland. Het knelpunt zal naar verwachting eind 2026 verholpen zijn (Liander, 2023).

Op Terschelling is er een redundante kabel van 20 kV met een capaciteit van 8 MW. Terschelling heeft momenteel geen beschikbare capaciteit voor invoeding, maar wel voor afnemen.

Op Ameland is recentelijk het net verzwakt van 8 MW naar 24 MW, ook te zien aan de vier 20 kV kabels die naar het eiland lopen (Liander, 2023). Het plan voor deze verzwaring is gemaakt in 2019 en is gerealiseerd in 2022. Echter is er toen nog geen rekening gehouden met een elektrische veerboot, met opslag in de vorm van batterijen of lokale opwek door EuW. Momenteel is er dan ook geen capaciteit beschikbaar voor invoeding (Liander, 2023). De knelpunten die worden voorzien worden gefaseerd tot en met eind 2027 opgelost. Ongeveer 9 MW van het vermogen op Ameland gaat naar het NAM-platform voor de kust. Deze stroom lokaal leveren zou een kans kunnen zijn voor EuW. Het NAM-platform gaat vanaf 2030/2035 uit bedrijf, maar zal wellicht daarna als elektrolysestation kunnen gaan fungeren.

Ecologie

Ook bij Vlieland, Terschelling en Ameland liggen de zoekgebieden van in of nabij Natura 2000 gebieden. Ook hier zullen mogelijke effecten op de Natura 2000 gebieden belangrijke factoren zijn in het vergunningsverleningsproces.

Inschatting realiseerbaar potentieel Vlieland, Terschelling en Ameland in 2030

Door het militaire gebied rondom Vlieland en de beperkte netcapaciteit, verwachten we geen realisatie van golfenergieprojecten richting 2030. We verwachten ook niet dat getijdenenergieprojecten aangesloten worden op Vlieland.

Bij Terschelling is er voldoende ruimte voor golfenergie, terwijl de ruimte voor getijdenenergie beperkter is door de drukte op het water. Voor beiden geldt de beschikbare netcapaciteit als een belangrijke beperking. Op basis van de huidige beschikbare capaciteit verwachten we ook dat het realiseerbaar potentieel op Terschelling tot 2030 zeer beperkt is. Als er meer ruimte ontstaat op het net verwachten we op basis van de vraag dat er maximaal 5 MW getijdenenergie of 7-22 MW golfenergie gerealiseerd kan worden, in combinatie met lokale opslag van elektriciteit op het eiland.

Bij Ameland zien we een hoger potentieel voor getijdenenergie doordat het er minder druk is op het water. Als er de komende jaren voldoende ruimte vrijkomt op het net dan is de kans groot dat de beoogde 10 MW gerealiseerd kan worden door de hoge vraag op Ameland (inclusief 9 MW voor het NAM-platform) en de grote capaciteit van de kabel naar land. Ook voor golfenergie zien we, als er ruimte vrijkomt op het net, relatief hoog realiseerbaar potentieel door de beschikbare ruimte, hoge vraag op Ameland en capaciteit van de kabel naar het vasteland. We verwachten dat er in combinatie met lokale opslag van elektriciteit maximaal 28-84 MW aan golfenergie gerealiseerd kan worden, op basis van de elektriciteitsvraag op Ameland. Ook hier kan er door de beperkte ruimte op het net concurrentie ontstaan tussen getijdenenergie en golfenergie, waardoor niet beide potentiëlen volledig benut kunnen worden.

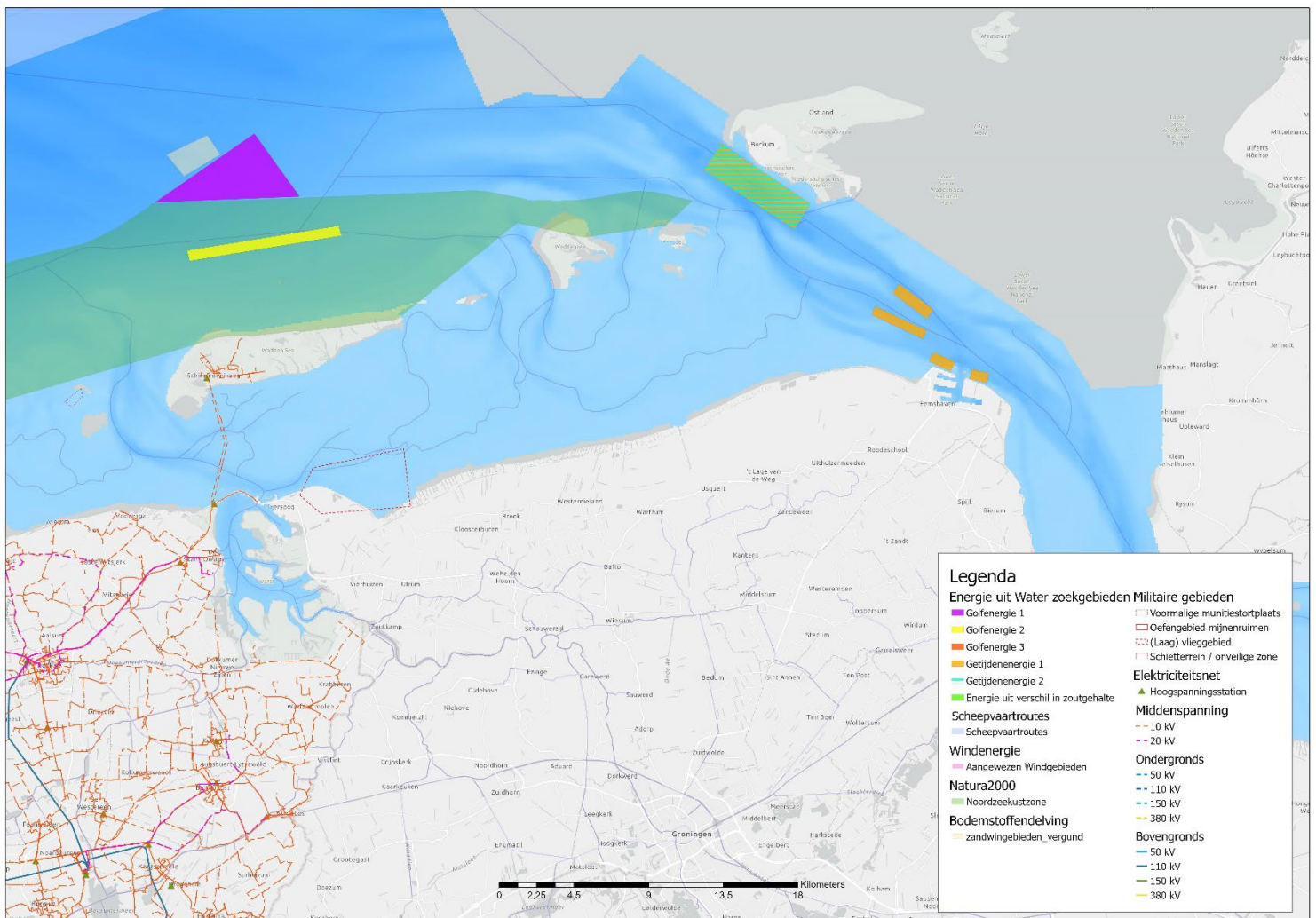
Ecologische overwegingen die het realiseerbaar potentieel kunnen beperken zijn niet meegenomen in deze inschatting.

In **Tabel 4.4** staat een overzicht van de inschattingen voor maximaal haalbare potentiëlen golfenergie en getijdenenergie bij Vlieland, Terschelling en Ameland op basis van de lokale elektriciteitsbehoefte in 2030, onder voorwaarde dat er ruimte komt op de netten voor inpassing van de technieken en voldoende opslag is om de lokale vraag te voorzien.

Tabel 4.4: Overzicht inschattingen maximaal haalbare potentiëlen golfenergie en getijdenenergie bij Vlieland, Terschelling en Ameland op basis van de lokale elektriciteitsbehoefte in 2030, onder voorwaarde dat er ruimte komt op de netten voor inpassing van de technieken en voldoende opslag is om de lokale vraag te voorzien. De maximale potentiëlen van golfenergie en getijdenenergie per eiland kunnen naar inschatting niet beiden tegelijk benut worden, waardoor het totale potentieel per eiland lager is dan de som van de twee technieken.

Techniek	Vlieland	Terschelling	Ameland
Getijdenenergie	0 MW	5 MW	10 MW
Golfenergie	0 MW	7-22 MW	28-84 MW

4.3.3 Schiermonnikoog en de Eems



Figuur 4.6: Overzicht gebiedsgebruik Schiermonnikoog en de Eems.

Gebiedsomschrijving

Het gebied rondom Schiermonnikoog en de Eems wordt vooral gekarakteriseerd door de vaarweg richting de Eemshaven, Delfzijl en de rivier Eems. Groot scheepvaartverkeer kan hier van de scheepvaartroute op de Noordzee afslaan en naar de Eemshaven varen. De vaarwegen zijn hier een stuk breder en rechter om grote schepen te kunnen faciliteren. Het Natura 2000 gebied ‘de Noordzeekustzone’ is voor de kust van Schiermonnikoog ongeveer 7 km breed en wordt steeds smaller richting Rottumerplaat en Rottumeroog (2 km). Er is één zandwingsgebied ten noorden van Schiermonnikoog en er is een klein vlieggebied voor militaire oefeningen ten noordoosten van het Lauwersmeer.

Ruimte voor getijdenenergie

Voor getijdenenergie zijn de vaargeulen richting de Eemshaven het meest interessant gezien de grotere diepte en sterkere stroming. *Getijdenenergie 1* heeft zoekgebieden aangegeven rondom vaargeulen, voor het eiland Borkum en twee kleine gebieden naast de ingang van de Eemshaven. In totaal voorziet *Getijdenenergie 1* ongeveer 10 MW aan geïnstalleerd vermogen op deze locaties.

Ruimte voor golfenergie

Voor golfenergie hebben *Golfenergie 1* en *Golfenergie 2* deze locatie als potentieel interessant aangegeven. Wederom denken wij dat het verkrijgen van vergunningen makkelijker zal zijn voor *Golfenergie 2* als de zoekgebieden buiten het Natura 2000 gebied 'de Noordzeekustzone' liggen. De locatie die *Golfenergie 1* heeft aangegeven lijkt ons een goede plek om golfenergie te realiseren.

Netinpassing

Op het gebied van netinpassing heeft Schiermonnikoog een redundante 10 kV kabel lopen met een capaciteit van 4 MW. Echter kan er door spanningsproblemen maar 50% van dit vermogen benut worden. Momenteel kan er dus ook niet voldaan worden aan nieuwe aanvragen, zowel voor invoeding als afname. Liander werkt aan het verzwaren van de verbinding met Schiermonnikoog en verwacht de werkzaamheden in 2029 te voltooien (Liander, 2023).

Ecologie

Wederom liggen de zoekgebieden in of vlak bij de Natura 2000 gebieden en zullen ecologische effecten een belangrijke factor zijn in het verkrijgen van vergunningen voor projecten.

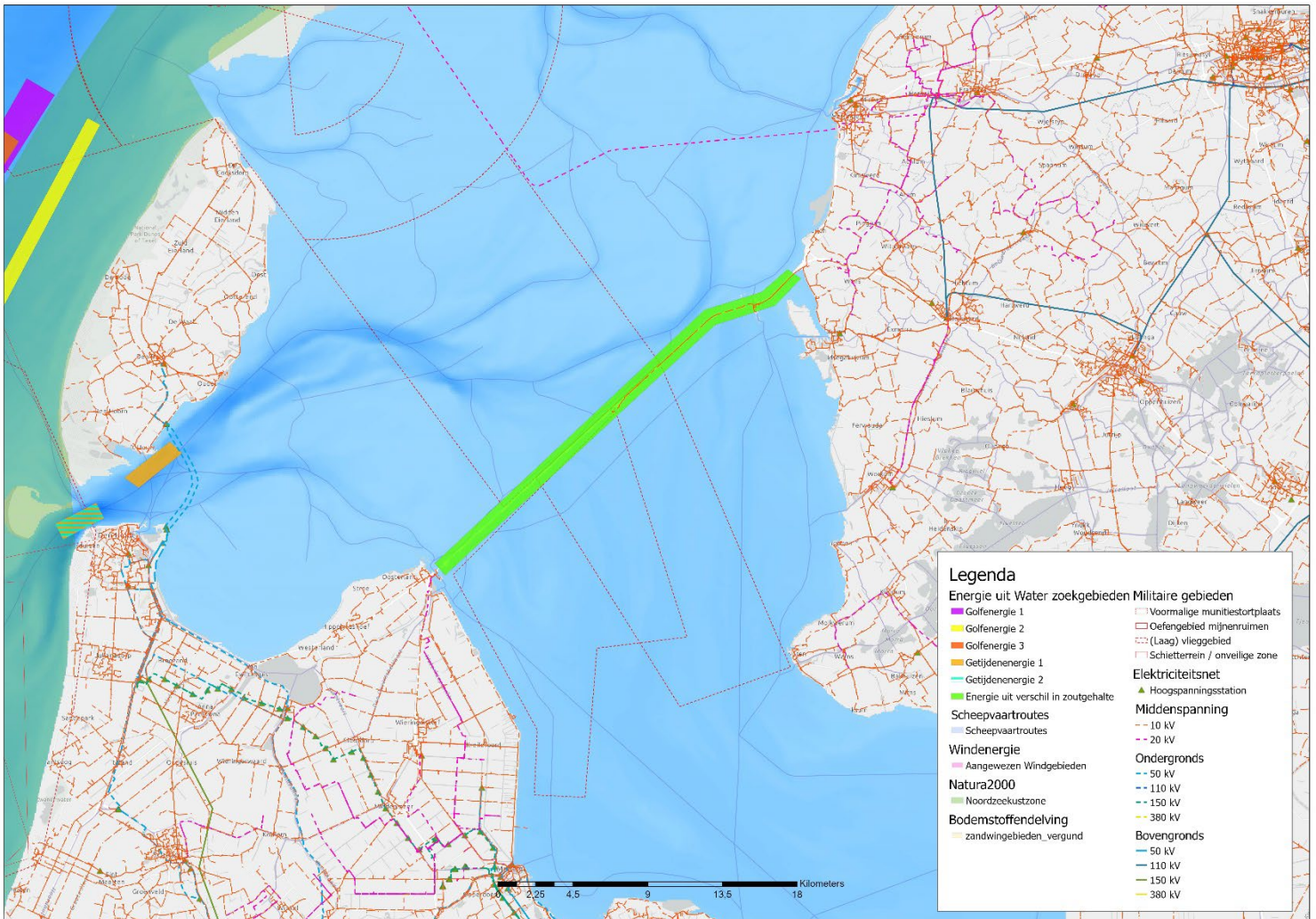
Inschatting realiseerbaar potentieel Schiermonnikoog en de Eems in 2030

Gezien de grootschalige beroepsvaart verwachten wij dat het realiseren van getijdenenergieprojecten in en rondom de Eems lastig kan zijn. Omdat de zoekgebieden grotendeels ankerplaatsen omvatten zou met Groningen Seaports afgesproken kunnen worden dat de getijdeninstallaties tijdelijk stilgelegd worden als andere schepen daar moeten ankeren. Realisatie zou dan wel tot stand kunnen komen, mits stilleggen niet te vaak nodig is. Als de installaties te vaak stilgelegd moeten worden zal er geen rendabele businesscase meer mogelijk zijn. Naar verwachting zal zo'n clause het verkrijgen van financiering echter wel bemoeilijken.

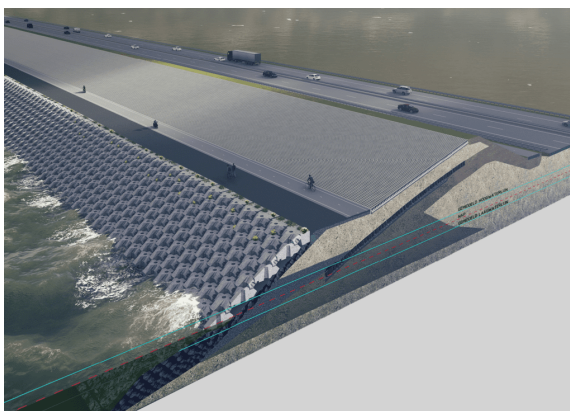
Voor golfenergie zien we de beschikbare netcapaciteit op Schiermonnikoog als belangrijke beperkende factor. Als de congestieproblematiek tegen 2030 verholpen is en er ruimte ontstaat op het net verwachten we dat er maximaal 2-5 MW aan golfenergie aangesloten kan worden, in combinatie met lokale opslag van elektriciteit.

Ecologische overwegingen die het realiseerbaar potentieel kunnen beperken zijn niet meegenomen in deze inschatting.

4.3.4 De Afsluitdijk



Figuur 4.7: Overzicht gebiedsgebruik bij de Afsluitdijk.



Figuur 4.8: Doorsnede toekomstige Afsluitdijk. (De Afsluitdijk, 2023)

Gebiedsomschrijving

Het gebied rondom de Afsluitdijk is gekarakteriseerd door de Natura 2000 gebieden 'de Waddenzee' en 'het IJsselmeer' en natuurlijk de Afsluitdijk zelf. Er zijn meerdere vaarwegen die door beide gebieden lopen en er zijn twee locaties waar scheepvaartverkeer de Afsluitdijk kan passeren: de Stevinsluis in het westen en de Lorentzsluis in het oosten. Verder zijn er meerdere laagvlieggebieden voor militaire oefeningen aan beide kanten van de Afsluitdijk. Bij Den Oever is er een vispassage waardoor vissen (en dus ook water) tussen het IJsselmeer en de Waddenzee kunnen migreren (Rijkswaterstaat, 2023). Ook wordt er een vismigratierivier gerealiseerd nabij de Lorentzsluis (origineel geplande opening in 2023) (De Blijvis, 2023).

Ruimte voor energie uit het verschil in zoutgehalte tussen twee waterlichamen

Er staat reeds een opstelling op de Breezanddijk, ongeveer in het midden van de Afsluitdijk. Voor opschaling geeft de ontwikkelaar aan dat het pompen van zoet en zout water op meerdere locaties verspreid over de afsluitdijk moet gebeuren. Aangezien de efficiëntie van de techniek berust op een maximaal saliniteitsverschil stellen wij dat de pomplocaties in ieder geval niet in de buurt van de Stevinsluis, de Lorentzsluis of de vispassage bij Den Oever moeten liggen. De Afsluitdijk zal ook voor fietsers toegankelijk zijn waarbij het ontwerp van nieuwe locaties rekening mee gehouden moet worden.

Netinpassing

Aan beiden kanten van de Afsluitdijk is er bij Liander momenteel geen capaciteit beschikbaar voor invoeding (Liander, 2023) (Liander, 2023). Aan de Friese kant worden de problemen volgens verwachting in 2024 en 2025 opgelost. Aan de kant van Noord-Holland worden er gefaseerde werkzaamheden voorzien tussen 2024 en 2028.

Op het net van TenneT is er momenteel geen ruimte in Friesland, maar wel in Noord-Holland (TenneT, 2023). In Friesland verwacht TenneT structureel congestie tot en met ten minste 2028 (TenneT, 2023). De ontwikkelaar geeft wel aan een invoedingsovereenkomst te hebben met TenneT voor de beoogde productieomvang van maximaal 100 MW aan installaties. Deze overeenkomst hebben we niet ingezien.

Ecologie

Het brakke water uit de beoogde installatie komt terecht in de Waddenzee, wat een Natura 2000 gebied is. Ecologische effecten zijn ook hier daarom een cruciale factor voor projectrealisatie en het verkrijgen van vergunningen.

Inschatting realiseerbaar potentieel Afsluitdijk 2030

Het realiseerbare potentieel op de Afsluitdijk hangt af van de mogelijkheden voor netinpassing richting 2030, de vergunningverlening voor het bouwen van meerdere (grote) installaties op de Afsluitdijk en de ontwikkeling van de techniek. Gezien de ontwikkelaar momenteel een nieuwe pilot gaat ontwikkelen, de lange doorlooptijd voor nieuwe projecten en gezien de afspraken die gemaakt moeten worden voor uitbreiding bij de Afsluitdijk, verwachten we dat een eerste MW-schaal installatie (1-10 MW) in 2030 maximaal realiseerbaar is.

Ecologische overwegingen die het realiseerbaar potentieel kunnen beperken zijn niet meegenomen in deze inschatting.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In deze expertreview zijn zes energie uit water (EuW) technieken beschouwd en is er geanalyseerd wat hun rol kan zijn in het realiseren van de twee verduurzamingsambities van het Waddengebied:

1. Rond 2030 20 tot 40% van het elektriciteitsverbruik van huishoudens zelf te produceren in het Waddengebied – Groningen, Friesland en de kop van Noord-Holland.
2. De Waddeneilanden op jaarbasis geheel zelfvoorzienend in hun eigen elektriciteitsbehoefte in 2026.

Om de eerste ambitie te vervullen is er 560 – 1120 GWh/jaar elektriciteitsproductie in het Waddengebied nodig. Dit is berekend middels een analyse van het elektriciteitsverbruik in het gebied, de verwachte bevolkingsmutaties en stijgende elektriciteitsvraag door toenemend gebruik van warmtepompen en thuisladen van elektrische voertuigen. Het ingeschatte elektriciteitsverbruik van huishoudens in het Waddengebied is daarmee 2600 GWh in 2026 en 2800 GWh in 2030.

Om de tweede ambitie te vervullen is er op de Waddeneilanden 110 – 180 GWh/jaar additionele elektriciteitsproductie nodig. Het verwachte elektriciteitsverbruik op de Waddeneilanden zelf is 145 GWh/jaar in 2026. Hier komt naar schatting nog 60 - 70 GWh aan vraag bij van het geëlektrificeerde NAM-platform bij Ameland. Momenteel wordt er naar schatting ongeveer 35 GWh aan zonne-energie opgewekt op de eilanden. Voor het realiseren van deze ambitie is er op de eilanden opslag nodig naast duurzame opwek. Alternatieve energiebronnen, zoals golfenergie en getijdenenergie, kunnen de benodigde opslag verlagen. Hoeveel dit exact is verschilt per bron, technologie en locatie en zal door middel van systeemoptimalisatie moeten worden bepaald. Dat valt niet binnen de scope van dit onderzoek.

De werking en geschatte elektriciteitsproductie van elk van de technieken lijkt ons realistisch.

De werking van de techniek is voor ons duidelijk en het is aannemelijk dat er met elk soort apparaat elektriciteit opgewekt kan worden. De meeste onzekerheid is over *Getijdenenergie 2* vanwege het vroege stadium van de ontwikkeling van dit ontwerp.

De elektriciteitsproductie per apparaat die gerapporteerd is door de ontwikkelaars achten wij aannemelijk voor toepassing in het Waddengebied. Echter, wij hebben geen diepgaande technische analyse gedaan van de specifieke concepten. De drie golfenergieontwikkelaars hebben elk een verschillend ontwerp en een verschillende grootte van hun apparaat. Hierbij zien we dus ook een verschillende hoeveelheid vollasturen en jaarlijkse elektriciteitsproductie. Op basis van de informatie die ons is geleverd door de ontwikkelaars zijn de verhoudingen tussen capaciteit en jaarlijkse productie in lijn met de verwachtingen. De elektriciteitsproductie gerapporteerd door *Getijdenenergie 1* is in lijn met eerdere literatuur en de SDE++. De verwachte productie van de beoogde installatie voor energie uit het verschil in zoutgehalte is lager dan is gerapporteerd in eerdere studies. Deze nieuwe inschatting lijkt

ons echter meer aannemelijk door een meer realistische schatting van de hoeveelheid vollasturen, te weten 4500.

Technische aspecten rondom opschaling van de technieken en de robuustheid van de apparaten zijn belangrijke aandachtspunten.

Aangezien de technieken nog in ontwikkeling zijn, zijn technische aspecten die over opschaling gaan (meerdere apparaten koppelen, array effecten, stroomkabels, aanlanding, etc.) niet adequaat te toetsen. De ideeën die de ontwikkelaars ons hebben aangereikt over opschaling van hun technieken achten wij aannemelijk.

De techniekvarianten voor golf- en getijdenenergie genereren elk op een eigen manier beweging, die vervolgens weer omgezet wordt in elektriciteit. De werking hiervan is in alle gevallen aangetoond, maar op dit moment is het nog niet mogelijk om een uitspraak te doen over de robuustheid op de langere termijn. Onderdelen zoals tandheugels, scharnieren, hydraulische systemen en andere bewegende delen zijn potentiële kritieke punten. De soms ruwe omstandigheden op zee vragen om zeer betrouwbare technieken. Het losraken en botsen van apparaten moet te allen tijde worden voorkomen gezien de drukbezette Noordzee. Voor osmose zijn de fysieke omstandigheden minder extreem, wat een voordeel is voor deze variant. Het toetsen van deze robuustheid moet uitgevoerd worden door een daartoe gecertificeerd bureau. Dit is tot op heden naar onze informatie nog bij geen enkele van de ontwikkelaars gebeurd.

Er is voldoende potentieel in het Waddengebied voor de beoogde plannen van de ontwikkelaars richting 2030.

De opgetelde ambities van de ontwikkelaars zijn goed voor 300 - 325 MW aan geïnstalleerde capaciteit en 850 - 910 GWh aan elektriciteitsproductie per jaar (zie [Tabel 5.1](#)). Voor golfenergie specifiek is het theoretisch en technisch potentieel in de zee aanzienlijk groter dan de 155 - 180 MW en 135 - 200 GWh per jaar beoogd door de ontwikkelaars. Dat wil zeggen dat er genoeg golfkracht in de zee aanwezig is en er ook genoeg locaties zijn waar deze gewonnen zou kunnen worden.

Voor getijdenenergie is de totale winbare kracht in water kleiner en zit *Getijdenenergie 1* met een beoogde 40 MW dicht bij het maximale potentieel in de Waddenzee. Ontsluiting van dit totale potentieel in 2030 lijkt ons lastig realiseerbaar. Met name bij de Eems denken we dat projecten lastig te realiseren zullen zijn door de grootschalige beroepsvaart die daar plaatsvindt. Ook de benodigde tijd voor opschaling, vergunningverlening en de beperkte ruimte op het elektriciteitsnet maken het lastig om het complete potentieel in 2030 al te ontsluiten.

Er voldoende zoet water afvoer voor een 100 MW installatie van energie uit het verschil in zoutgehalte, maar in tegenstelling tot eerdere aannames zal deze installatie geen 8000 vollasturen maken. De nieuwe verwachte productie is 450 GWh per jaar, gebaseerd op 4500 vollasturen voor een netto geleverd vermogen van 67 MW. Deze elektriciteitsproductie is erop gebaseerd dat op sommige momenten in het jaar de installatie niet zijn volle vermogen kan leveren door lager wateraanbod. In sommige droge periodes zal korte tijd vrijwel al het zoete water van het IJsselmeer naar de Waddenzee door de installatie moeten stromen, waardoor dit ook de bovenkant is van het realiseerbare potentieel. De omvang van het geïnstalleerd vermogen staat volgens de ontwikkelaar nog niet vast en wordt bepaald door de business case en benodigde investering.

Tabel 5.1: Overzicht totaal geïnstalleerd vermogen en jaarlijkse elektriciteitsproductie in 2030 per techniek volgens de ambities van de ontwikkelaars.

Partij	Beoogd geïnstalleerd vermogen 2030 door ontwikkelaar (MW)	Verwachte productie 2030 (GWh/jaar)	Aantal benodigde apparaten
<i>Golfenergie 1</i>	5 - 30	15 - 90	50 - 300
<i>Golfenergie 2</i>	100	100	33
<i>Golfenergie 3</i>	50	110	500
<i>Getijdenenergie 1</i>	40	150	80
<i>Getijdenenergie 2</i>	5	12,4	100
<i>Energie uit het verschil in zoutgehalte</i>	100	450	1 of meer
Totaal	300 - 325	847,4 - 912,4	
Ambitie 1: Aandeel van elektriciteitsverbruik huishoudens in het Waddengebied		31-34%	
Ambitie 2: Aandeel van elektriciteitsverbruik Waddeneilanden		>100%	

De verwachte elektriciteitsproductie die door EuW in 2026 gerealiseerd kan worden is beperkt.

Een aantal ontwikkelaars beogen in 2026 al op commerciële schaal projecten te realiseren. De huidige status van de opschaling van technieken, de beperkte netcapaciteit en de doorlooptijd voor het verkrijgen van vergunningen samen brengen ons tot de conclusie dat het onwaarschijnlijk is dat er in 2026 al grote projecten gerealiseerd kunnen zijn. We verwachten dat in 2026 maximaal een paar (kleinschalige) pilot- of demonstratieprojecten gerealiseerd zijn met slechts een beperkte elektriciteitsproductie. We verwachten daarmee ook dat een bijdrage van de EuW-technieken aan de tweede doelstelling van het Waddenfonds, de Waddeneilanden zelfvoorzienend op jaarbasis in 2026, zeer beperkt zal zijn.

Er is voldoende fysieke ruimte voor de ambities van de ontwikkelaars, maar de ruimte wordt ook voor veel andere doeleinden gebruikt. Ruimte op het elektriciteitsnet is zeer beperkt waardoor maatwerkafspraken nodig zijn.

Ondanks dat fysieke ruimte schaars is in het Waddengebied zijn er genoeg locaties waar EuW gewonnen zou kunnen worden. Het aandachtspunt voor getijdenenergie is met name de vaarwegen. Voor golfenergie is het van belang aandacht te geven aan militaire oefenzones en zandwingebieden. Ook moet er goed nagedacht worden over de kabels die vanuit een golfenergiepark naar land lopen, omdat deze ook door zandwingebieden kunnen lopen. Op basis van alle verschillende gebruiken in het Waddengebied hebben we enkele locaties geïdentificeerd waar we kansen zien voor EuW.

De techniekvarianten voor golf- en getijdenenergie nemen, bij volledige uitrol van het potentieel, aanzienlijke gebieden in waar vervolgens scheepvaart geweerd zal moeten worden. Robuustheid van het ontwerp en reductie van faalkansen is hierbij zeer belangrijk. Vanzelfsprekend is schadeverzekering hierbij ook een aandachtspunt, waarbij de hoogte van de premie onzeker is maar wel invloed kan hebben op de business case. Tevens is de

reputatieschade aanzienlijk wanneer er averij opgelopen wordt. Dit is ook een aandachtspunt bij vergunningverlening door Rijkswaterstaat, wat wederom het belang van een officiële externe certificering van robuustheid onderstreept.

Momenteel is er nagenoeg geen ruimte op het elektriciteitsnet door congestieproblematiek. De komende jaren komt er langzamerhand meer ruimte vrij op het net. Aangezien netbeheerders middels een ‘first-come first-serve’ principe moeten werken zou het lang kunnen duren totdat de aanvragen van EuW-projecten behandeld worden. Als EuW-projecten gecombineerd kunnen worden met opslag en daarbij afgestemd worden op lokaal verbruik is er naar verwachting van Liander meer mogelijk. Op basis van de vraag op de Waddeneilanden verwachten we dat er dan maximaal zo'n 30 MW getijdenenergie en 60-180 MW golfenergie ingepast kan worden. Hiervoor zijn echter (regeltechnische en juridische) wijzigingen nodig die de netbeheerders meer ruimte geven om andere factoren mee te nemen in de afwegingen voor de volgorde waarin projecten aangesloten worden.

Vergunningsverlening van aanvragen kan snel gaan, maar voorbereidingen kunnen veel tijd in beslag nemen.

Bij grote projecten duurt een geheel traject vanaf het indienen van een complete vergunningsaanvraag ongeveer een half jaar, mits de aanvrager gedegen vooronderzoek heeft gedaan. Een dergelijk voortraject kan enkele jaren duren. Voor de EuW-technieken is ons door Rijkswaterstaat verteld dat het met name belangrijk is dat er door een onafhankelijk en daartoe bevoegde organisatie onderzoek gedaan is naar de betrouwbaarheid van de installatie en er aangetoond is dat de kans nagenoeg uitgesloten is dat de installatie van zijn plaats geslagen wordt.

Gezien de huidige ontwikkeling van de installaties, de netbeperkingen en lange voortrajecten voor vergunningverlening achten we de kans klein dat de technieken al voor 2030 commercieel uitgerold worden zoals beoogd door een aantal van de ontwikkelaars.

Alle golf- en getijdenontwikkelaars moeten nog meerdere opschalingsstappen zetten naar commerciële productie. Sommigen moeten nog een eerste pilotproject op zee op volledige schaal toetsen en anderen zijn toe aan een eerste project met meerdere arrays aan apparaten. Het exacte tempo van deze opschaling is lastig in te schatten. Onze beoordeling is dat het verloop van deze opschaling meer tijd in beslag dan waar sommige ontwikkelaars momenteel van uitgaan.

Gezien de beperkingen rondom nieuwe aansluitingen op het net en de potentieel lange voortrajecten voor vergunningsverlening achten wij de kans klein dat de ontwikkelaars enkele honderden apparaten uitgerold hebben op commerciële schaal voor 2030.

Voor de techniek voor energie uit het verschil in zoutgehalte verwachten we dat er voor 2030 maximaal nog één stap nodig is voor een eerste MW-schaal installatie (1-10 MW). De komende jaren zal de ontwikkelaar bezig zijn met het realiseren van een 16,5 kW demonstratie waar recentelijk subsidie voor is verkregen van het Waddenfonds. Een sprong van kW schaal naar een installatie van 100 MW is mogelijk, maar lijkt ons minder realistisch dan opschaling in twee stappen met nog een 1-10 MW schaal project voor de opschaling naar 100 MW.

Het effect van de technieken op de ecologie kan mogelijk het realiseerbaar potentieel beperken.

Alle zoekgebieden liggen in of nabij Natura 2000 gebieden, wat de ecologische effecten van cruciaal belang maakt. Voor alle technieken loopt er onderzoek naar de ecologische effecten of is er al onderzoek gedaan naar deze effecten. Op basis van deze studies valt te

concluderen dat het mogelijk is om projecten te ontwikkelen die geen significant negatieve effecten hebben op de ecologie. Beoordeling van de specifieke ecologische effecten op het realiseerbaar potentieel in de verschillende zoekgebieden is echter niet gedaan in deze studie. Hierdoor blijft het onzeker of er nog mogelijke beperkingen zijn op de mogelijkheden voor realisatie van projecten binnen deze zoekgebieden.

Tabel 5.2: Inschatting van het maximale dat de EuW-technieken in 2030 bij kunnen dragen onder voorwaarde dat er voldoende netcapaciteit is, de vergunningverlening op tijd is afgerond, de techniek tot commerciële schaal opgeschaald is, geen significante ecologische beperkingen zijn, er geen verdere opschaling is van zonne-energie op de eilanden en er voldoende energieopslag is om vraag en aanbod op de Waddeneilanden te balanceren.

Techniek	Maximum in 2030 volgens TNO (GWh/jaar)	Maximum in 2030 volgens TNO (MW)
Golfenergie	181 ¹	60 – 180 ²
Getijdenenergie		30 ³
Energie uit het verschil in zoutgehalte	45	10 ⁴
Totaal	226	70 – 190⁵
Ambitie 1: Aandeel van elektriciteitsverbruik huishoudens in het Waddengebied	8%	
Ambitie 2: Aandeel van elektriciteitsverbruik Waddeneilanden	>100% inclusief energie uit het verschil in zoutgehalte 83% exclusief energie uit het verschil in zoutgehalte	

- ¹ Dit theoretisch maximum is ingeschat op basis van de elektriciteitsvraag op de Waddeneilanden in 2030 en geldt voor het totaal van de golf- en getijdentechnieken.
- ² De drie golfontwikkelaars kunnen in 2030 samen maximaal 181 GWh winnen (als er geen getijdenenergie ontwikkeld wordt). Op basis van de verschillende ontwerpen is dit 60 – 180 MW, afhankelijk van de vollasturen per apparaat.
- ³ De twee getijdenontwikkelaars kunnen in 2030 samen maximaal 30 MW winnen. De verdeling tussen de ontwikkelaars hangt af van hun ontwikkelpaden.
- ⁴ Het is onze inschatting dat de ontwikkelaar voor energie uit het verschil in zoutgehalte in 2030 maximaal een eerste MW schaal installatie (1-10 MW) kan realiseren.
- ⁵ Ondergrens is alleen *Golfenergie 1* (60 MW met 3000 vollasturen) en energie uit het verschil in zoutgehalte. Bovengrens is *Golfenergie 2* (180 MW met 1000 vollasturen) en energie uit het verschil in zoutgehalte. Als *Getijdenenergie 1* 30 MW realiseert wordt de bandbreedte 80-170 MW doordat er op sommige eilanden dan niet meer voldoende vraag is voor het complete potentieel aan golfenergie.

Huidige kosten zijn hoog; voor een daling in kosten is opschalen van belang. Op de korte termijn is er (financiële) ondersteuning nodig voor opschaling. Hoe competitief de EuW-technieken worden (onderling en ten opzichte van andere hernieuwbare energieproductie) is naast kosten afhankelijk van wat de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit zijn.

De verwachte elektriciteitsproductiekosten liggen voor de pilots en prototypes nog vrij hoog (ruim boven 10 cent/kWh) en door de huidige status van ontwikkeling ook niet heel goed in te schatten. Alleen bij volgende generaties voor energie uit water kunnen de kosten naar competitieve niveaus, tot uiteindelijk mogelijk minder dan 10 cent/kWh worden gebracht. Om dit te bereiken is schaalvergroting een belangrijke factor. Voor golfenergie en getijdenenergie gaat het om het in serie produceren van tientallen tot duizenden apparaten. Voor energie uit het verschil in zoutgehalte gaat het om opschalen naar grotere installaties (ordegrootte 5 MW of groter) en het in serie produceren van membranen.

Om daar te komen is het nodig dat er geïnvesteerd wordt in de opschaling van de technieken. Subsidies zullen nodig zijn als er onvoldoende geld opgehaald kan worden bij investeerders of uit de verkoop van elektriciteit.

In hoeverre het kostenniveau van de uit EuW opgewekte elektriciteit competitief is hangt onder andere af van de ontwikkeling van de groothandelsprijs van elektriciteit. De Klimaat- en Energieverkenning van PBL (PBL, TNO, CBS & RIVM, 2022) geeft voor het jaar 2030 een bandbreedte van 5 tot 9,3 cent/kWh en voor het jaar 2040 een enkele waarde van 8,7 cent/kWh. Voor de EuW-technieken speelt mee dat ze ook op tijden produceren wanneer er weinig zon en wind is en er dan naar verwachting meer verdiend kan worden op de elektriciteitsmarkt. In algemene zin achten we het nog onwaarschijnlijk dat EuW in 2030 competitief kan zijn, maar tegen 2040 zouden, bij aanhoudend hoge elektriciteitsprijzen, de kansen kunnen keren, op voorwaarde van sterke kostenreductie bij EuW.

EuW-technieken kunnen eventuele ecosysteemdiensten leveren en aanvullende maatschappelijke baten geven. Het kwantificeren van deze diensten en baten zal belangrijk zijn om de ontwikkeling te versnellen.

- Het grootste voordeel van EuW-technieken in het Waddengebied is dat er lokaal CO₂-neutrale elektriciteit geproduceerd wordt. Hierdoor wordt de lokale industrie ondersteund en kan belasting op het regionale elektriciteitsnet verlaagd worden. Vanaf 2030 verwachten we dat het grootste deel van de landelijk opgewekte elektriciteit CO₂-vrij zal zijn en dan zal de CO₂-reductie minder belangrijk worden vergeleken met de voordelen voor de lokale industrie en het regionale elektriciteitsnet.
- EuW-technieken staan veelal minder in het zicht dan duurzame opties zoals wind-op-land en zon. In plaats van windmolens op de Waddeneilanden te moeten plaatsen zou de groene stroom van (vrijwel) onzichtbare golf- en getijdenapparaten in de zee kunnen komen.
- Golf- en getijdenapparaten met betonnen ankers creëren een hard substraat op de bodem waar een ecosysteem zou kunnen floreren. Hierbij moet gezegd worden dat het een tijdelijk ecosysteem betreft aangezien de ankers na looptijd van het project ook weer verwijderd dienen te worden.
- EuW-technieken hebben een ander productieprofiel in vergelijking met wind- en zonne-energie en kan daardoor dus positieve effecten hebben op het energiesysteem. Met name getijdenenergie is erg goed voorspelbaar. Golfenergie heeft over het algemeen meer productie in de winter, wanneer zonne-energie schaarser is.
- Golfdemping als gevolg van een golfenergie-installatie kan zorgen voor verminderde erosie van de kust waardoor zandsuppletie minder vaak nodig is.
- Kennis en kunde op het gebied van EuW kan voor Nederland een exportproduct zijn. Golven en getijden komen voor over de hele wereld en het potentieel is in sommige landen vele malen groter dan in Nederland.

Hoewel al deze diensten en baten door de sector kwalitatief of in eerste tests reeds aangetoond zijn is er een bredere wetenschappelijke onderbouwing nodig voordat gesteld mag worden dat EuW op deze vlakken een aanzienlijk voordeel levert.

5.2 Aanbevelingen

Heroverweeg het doel voor zelfvoorzienende Waddeneilanden en bepaal de optimale mix aan technieken door middel van systeemstudies.

Het doel om de Waddeneilanden in 2026 op jaarbasis zelfvoorzienend te maken is niet haalbaar. Ook op de langere termijn is complete zelfvoorziening waarschijnlijk een uitdaging, zeker als er bepaalde technieken (zoals windenergie en zonneweides) niet ingezet (kunnen) worden. Het doel legt een grote druk op de Waddeneilanden met veel benodigde eigen opwek, opslag en voldoende netcapaciteit. De benodigde opwek, opslag en netcapaciteit op de eilanden kan sterk afnemen als er gebruik gemaakt wordt van de bestaande elektriciteitskabels naar het vasteland. Een doel voor bijvoorbeeld 70-90% zelfvoorziening is ambitieus, maar laat meer ruimte voor optimalisatie van de eigen benodigde opwek, opslag en netuitbreiding. De EuW-technieken kunnen ook een bijdrage leveren aan deze eigen opwek. Om te bepalen welke mix van technieken ingezet wordt raden we aan op systeemstudies te doen waarin gekeken wordt naar de verschillende mogelijkheden voor opwek en de respectievelijke impact op opslag en netverzwaring.

Ondersteun vanuit het Waddenfonds op de korte termijn de verdere opschaling van de EuW-technieken.

Het Waddenfonds heeft het doel om EuW-technieken bij te laten dragen aan de energieproductie in het Waddengebied. Om een significante bijdrage te leveren aan de energievoorziening van het Waddengebied, zoals de ambities van de ontwikkelaars in [Tabel 5.1](#), is opschaling van de EuW-technieken van groot belang. Verder moeten er vergunningen verkregen worden en is er ruimte nodig op het elektriciteitsnet om de EuW-technieken in te kunnen passen. Het Waddenfonds is goed gepositioneerd om de opschaling van de technieken te ondersteunen om zo samen met de markt (en overheid) ervoor te zorgen dat de technieken opgeschaald kunnen worden naar commerciële schaal. Het Waddenfonds ondersteunt nu al drie van de zes ontwikkelaars met subsidies voor pilot- en demonstratieprojecten. Bredere ondersteuning van de EuW-technieken vergroot de kans dat er in 2030 meerdere EuW-technieken volwassen zijn en een significante bijdrage kunnen leveren aan de doelen van het Waddenfonds. De ambitie van *Getijdenenergie 1* benut vrijwel het gehele potentieel voor getijdenenergie in het Waddengebied. Als deze ambitie gerealiseerd wordt blijft er weinig ruimte over voor *Getijdenenergie 2*, waarvan we door de huidige status van de techniek verwachten dat de opschaling langer zal duren. Als *Getijdenenergie 1* in 2030 niet het volledige potentieel heeft weten te benutten dan kan er wel een kans liggen voor *Getijdenenergie 2* om de bijdrage van EuW in het gebied te vergroten. Voor golfenergie zien we op basis van de huidige stand van zaken geen duidelijke winnaar. Daarom denken we dat een brede ondersteuning voor golfenergietechnieken zorgt voor een grotere kans dat een of meerdere van de technieken in 2030 een significante bijdrage kan leveren aan de doelen van het Waddenfonds. Bredere steun voor de golfenergietechnieken betekent wel dat er meer middelen voor vrijgemaakt moeten worden, wat weer ten koste kan gaan van hoeveel middelen er per EuW-techniek beschikbaar zijn.

Er zijn echter nog meer factoren die meegenomen kunnen worden om de keuze te maken om een techniek wel of niet te steunen. De onderstaande aanbevelingen bieden aanknopingspunten om mee te nemen in de voorwaarden voor financiële ondersteuning of om de ontwikkelaars te ondersteunen met opschaling door middel van niet-financiële steun.

Bekijk voor de geïdentificeerde zoekgebieden voor getijden- en golfenergie ook de verwachte productie op de locaties.

Lokale getijstrooming en golfcondities kunnen sterk verschillen van de ene locatie naar de andere. Het lag buiten de scope van deze studie om de werking van de verschillende ontwerpen in de specifieke stroming- en golfcondities te toetsen. Ook de ontwikkelaars hebben hier nog maar beperkte data voor of hebben deze niet met ons gedeeld. Voor vervolgstudies is het aan te raden om wel naar de werking op specifieke locaties te kijken om een beter beeld te krijgen van de potentiële en de verwachte elektriciteitsproductie. Het kan ook helpen bij de keuze tussen verschillende technieken omdat sommige ontwerpen op een locatie beter kunnen presteren dan anderen.

Kies zoekgebieden uit voor de ontwikkeling van EuW op locaties waar zo min mogelijk andere belangen een ruimteclaim hebben en waar grotere parken ontwikkeld kunnen worden.

Hoewel ruimte in het Waddengebied relatief schaars is zijn er plekken waar het verkrijgen van vergunning voor het ontwikkelen van EuW waarschijnlijk relatief eenvoudiger is dan op andere locaties. Wij adviseren om niet te gaan ontwikkelen binnen het Natura 2000 gebied 'de Noordzeekustzone', binnen aangewezen militaire gebieden voor vlieg-, schiet- en mijnruimingsoefeningen, in of in de buurt van vaarwegen of op aangewezen locaties voor zandwinning. **Figuur 5.1** geeft aan welke locaties wij inschatten als gunstig voor de ontwikkeling van EuW, specifiek golfenergie. Let bij de aanbevolen locatie voor de kust van Texel op dat bekabeling van het beoogde golfenergiepark mogelijk niet door het nabijgelegen zandwingebied kan lopen. Voor golf- en getijdenenergie is opschaling naar parken van enkele MW van belang voor de ontwikkeling van de techniek en voor het behalen van de benodigde schaal en kostenreductie. Richt daarom ook op locaties waar er voldoende ruimte is om parken te kunnen realiseren.

Doe een review van de ecologische effecten voor de zoekgebieden.

E ecologische review viel buiten de scope van deze studie. De zoekgebieden liggen echter allemaal in of vlak bij natuurgebieden in het Waddengebied. Hoewel studies naar ecologische effecten voor de zes bestudeerde technieken laten zien dat het mogelijk is om projecten te ontwikkelen die geen significant negatieve effecten hebben op de ecologie, is nadere studie naar de specifieke zoekgebieden nodig. Een globale review kan een eerste inschatting geven van mogelijke knelpunten met het oog op natuurwaarden en een completer beeld geven van het potentieel voor EuW in het Waddengebied. Hiermee kunnen projecten vervolgens ook gericht ontwikkeld worden in gebieden waar minder knelpunten met natuurwaarden verwacht worden. Dat kan verrassingen later in de projectontwikkeling en eventuele vertragingen van projecten voorkomen. Daarnaast zal er bij de volgende opschalingsfasen van de technieken additioneel ecologisch onderzoek plaats moeten vinden die ook kunnen bijdragen om een beter beeld te krijgen van de meest geschikte locaties in en rondom het Waddengebied voor EuW.

Werk samen voor het ontwikkelen van standaarden voor de toetsing van robuustheid van technieken om vergunningverlening te versnellen. Laat robuustheid ook toetsen door een gecertificeerd bureau.

Omdat robuustheid van de technieken zo belangrijk is voor een succesvolle vergunningverlening raden we de ontwikkelaars aan om hierbij samen te werken en een common practice te definiëren voor het ontwerpen en berekenen van de installaties op zee. Door dit bij een externe partij te beleggen kan onafhankelijkheid gewaarborgd worden, wat het vertrouwen van vergunningverlener en financiers zal bevorderen. Ondersteuning vanuit het Waddenfonds voor deze toetsing van de robuustheid kan de vergunningverlening versnellen.

Kijk in vervolgstudies naar potentieel op langere termijn.

De TNO-inschatting van het maximale potentieel (zie Tabel 5.2) komt tot zo'n 8% van het elektriciteitsverbruik van huishoudens in het Waddengebied in 2030. De ambitie van de ontwikkelaars ligt al een stuk hoger (34%). Op termijn kan het aandeel van EuW bij aanhoudende groei groter worden, en daarom is de aanbeveling om bij een volgende studie vooral ook te kijken naar het EuW-aandeel in de elektriciteitsvraag van het jaar 2050.

Versnel het proces om winnende concepten te selecteren om cumulatieve investeringen beperkt te houden.

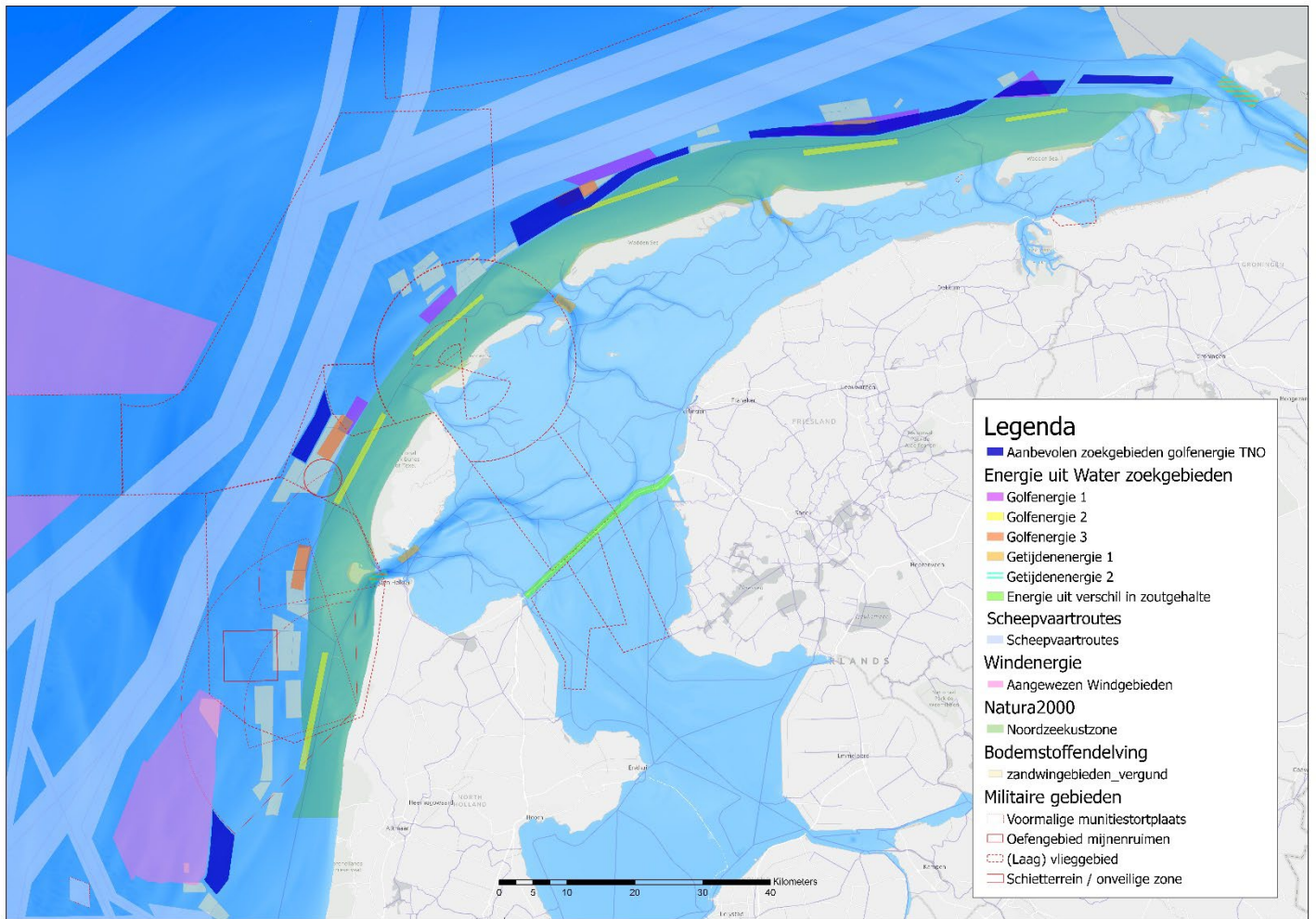
Diversificatie van technieken is in de basis een goede strategie, en dat geldt ook voor EuW. De verwachting is dat op termijn de winnende concepten boven komen drijven, maar het is de vraag op welk punt op de tijdslijn dit zal zijn. Dit kan bijvoorbeeld over twee jaar duidelijk worden, maar voor hetzelfde geld ook pas over 20 jaar. Er is in deze twee uitersten echter een groot verschil in de benodigde uitgaven voor onderzoek en ontwikkeling. Het lijkt slim om zo snel mogelijk tot dit punt van triage te komen, teneinde de benodigde cumulatieve financiering te minimaliseren. Het Waddenfonds kan hieraan bijdragen door op basis van een eigen afwegingskader te kiezen om door te gaan met bepaalde technieken en anderen af te laten vallen. Daarbij kan overigens ook buiten de landsgrenzen gekeken worden: bestaan er concepten die al verder in hun ontwikkeling zijn en waarvan robuustheid aangetoond is, overweeg daar dan mee in een consortium of joint venture samen te werken.

Kijk voor golfenergie ook naar gebieden ver op zee.

In de huidige visies over energieopwekking uit de Noordzee is wind op zee leidend bij het maken van de plannen. Dit is verdedigbaar vanwege het TRL-niveau van wind op zee. Voor de ontwikkeling van EuW op de Noordzee zou er ook focus gericht kunnen worden op deze gebieden ver op zee, omdat het potentieel voor golfenergie daar groter is en omdat daar zowel vergunning technisch als qua ecologie minder complexiteit te verwachten is.

Besprek EuW-plannen met de netbeheerders zodat er voor de ontwikkeling van netcapaciteit op de middellange en lange termijn rekening gehouden kan worden met de ontwikkeling van EuW-technieken, ook al is het lastig om in te schatten hoeveel er geïnstalleerd gaat worden.

Netaansluiting van EuW op land is op korte termijn een probleem. Op middellange termijn zou door de netwerkbedrijven meer op EuW geanticipeerd kunnen worden, terwijl op lange termijn EuW mee kan liften op de netaansluiting van wind op zee. Voor de ingroei van EuW en de demonstratieprojecten zijn zowel de korte, middellange als ook de lange termijn van belang. Als er bij de planning van de uitbreiding van elektriciteitsnetwerken al rekening gehouden wordt met de EuW-technieken kan dit voorkomen dat er later beperkingen zijn qua netcapaciteit. Ook als er nog onzekerheden zijn rondom de kwantitatieve ontwikkeling van EuW is het dus van belang om de plannen te bespreken met de netbeheerders.



Figuur 5.1: Aanbevolen zoekgebieden voor golfenergie door TNO.

Referenties

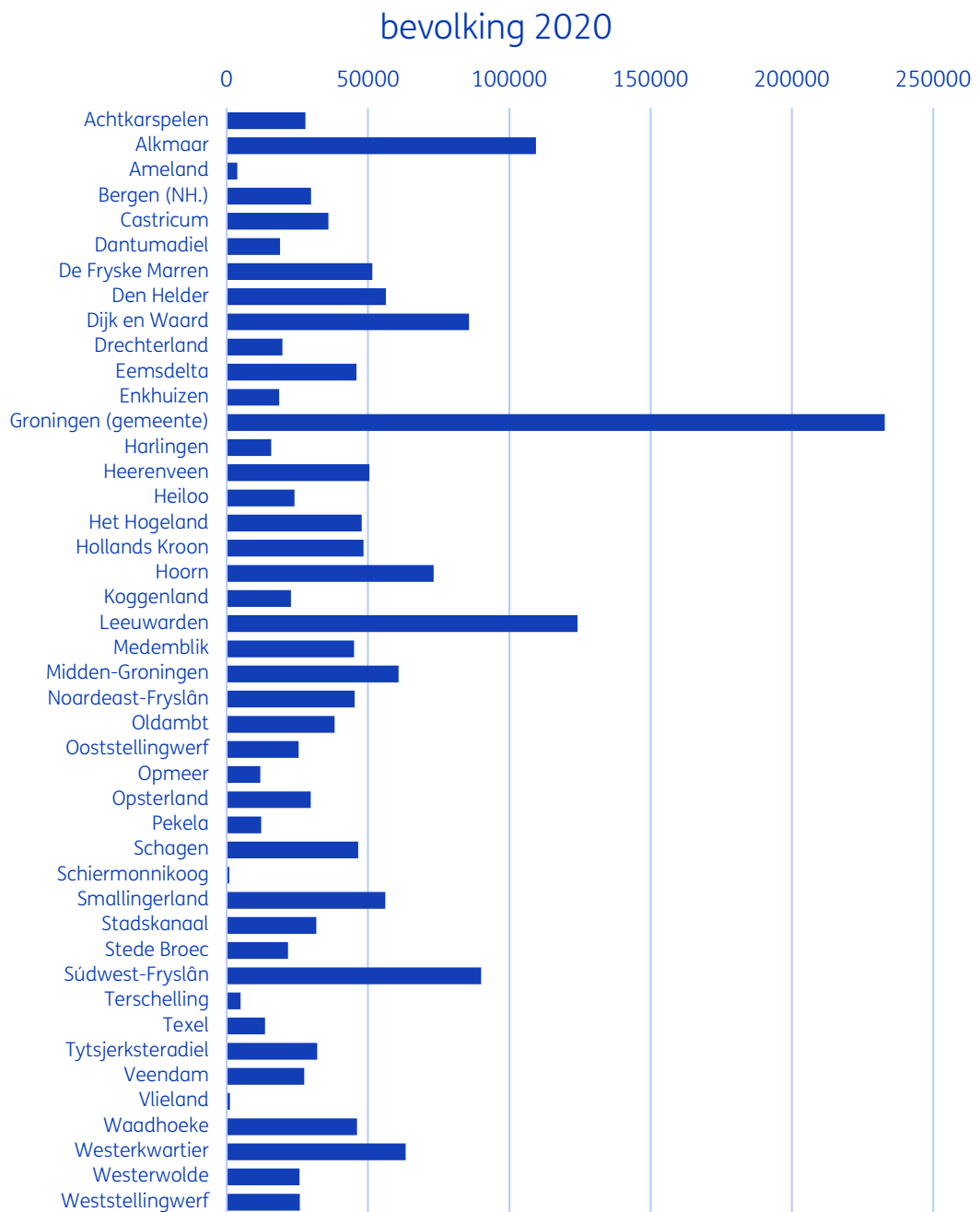
- CBS. (2022, 03 22). *Autobezit per huishouden, januari 2020*. Opgehaald van cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2022/12/autobezit-per-huishouden-januari-2020>
- CBS. (2023). *Groei en krimp per gemeente*. Opgeroepen op Januari 24, 2023, van <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/dashboard-bevolking/regionaal/groei-en-krimp>
- CBS. (2023). *Huishoudens nu*. Opgeroepen op Januari 2023, van <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/dashboard-bevolking/woonsituatie/huishoudens-nu#:~:text=Begin%202022%20waren%20er%208,gemiddelde%20huishoudensgrootte%20nog%203%2C53>.
- De Afsluitdijk. (2023). *De Afsluitdijk*. Opgeroepen op Augustus 2, 2023, van deafsluitdijk.nl/
- De BlijjeVis. (2023). *Vismigratierivier*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van [blijjevis.nl/](https://www.blijjevis.nl/vismigratierivier/)
- European Environment Agency. (2020). *Natura 2000 - Birds and Habitats Directives France*. Opgehaald van <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/natura-2000-birds-and-habitat-directives-12/france>
- EVOLVE. (2023). *The system benefits of ocean energy to European power systems. Technical note: EVOLVE country scale modelling study*.
- Gemeente Ameland; AEC; Wetterskip Fryslan. (2021). *Samenwerkingsovereenkomst ontwikkeling, realisatie en exploitatie 'zonnepark Ballumerbocht'*.
- Goden de Sousa Prado, M., Gardner, F., Damen, M., & Polinder, H. (2006). Modelling and test results of the Archimedes wave swing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220(8), 855-868. doi:<https://doi.org/doi:10.1243/09576509JPE284>
- Gonzalez Alday, M., & Lavidas, G. (2022). *Tidal Energy Assessment - North Sea Tial Database*. Delft: TU Delft.
- Gonzalez-Aparicio, I., Houwing, M., & Vitulli, A. (2023). *Wind and wave resource complementarity at a Dutch offshore site*. Den Haag: TNO.
- Herman, P., Jager, Z., van Walraven, L., Grasman, S., Wijsman, J., van Duren, L., & Siebers, R. (2020). *Onderzoek Omgevingseffecten Blue Energy. Synthese van vier jaar onderzoek*. Deltares.
- Hoefnagels, I. (2020). *Techno-economic analysis of the cost reduction potential of marine energy technology through learning curve modeling*.
- JRC. (2019). *Ocean energy technology development report*.
- Klimaatmonitor. (2023). *Regionale klimaatmonitor*. Opgeroepen op Januari 24, 2023, van <https://klimaatmonitor.databank.nl/jive>
- KNMI. (2023). *Uitleg over golven*. Opgeroepen op Juli 27, 2023, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-databank/uitleg/golven#:~:text=Golven%20vormen%20zich%20door%20de,de%20sterkte%20van%20de%20wind>.
- Lamboos, S., & van der Brink, R. (2021). *Stroom uit water. Onderzoek potentieel elektriciteitsopwekking uit water ten behoeve van de Verkenning Elektriciteit uit Water*. Den Haag: TNO.
- Lavidas, G. (2020). Selection index for Wave Energy Deployments (SIWED): A near-deterministic index for wave energy converters. *Energy*, 196, 117-131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117131>

- Lavidas, G., & Gonzalez Alday, M. (2022). *Wave Energy Assessment - North Sea Wave Database*. Delft: TU Delft.
- Lavidas, G., & Polinder, H. (2019). North Sea Wave Database (NSWD) and the Need for Reliable Resources Data: A 38 Year Database for Metocean and Wave Energy Assessments. *Atmosphere*.
- Lavidas, G., & Polinder, H. (2019). Wave energy in the Netherlands: Past, Present and Future perspectives. *13th European Wave and Tidal Energy Conference*. Naples, Italy.
- Lensink, S. (2020). *Eindadvies basisbedragen SDE++ 2020*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Lensink, S., & Schoots, K. (2023). *Eindadvies basisbedragen SDE++ 2023*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Liander. (2023). *Actuele knelpunten en oplossingen in Kop van Noord-Holland (Noord-Holland)*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van <https://www.liander.nl/grootzakelijk/transportschaarste/beschikbaarheid-capaciteit/noord-holland>
- Liander. (2023). *Actuele knelpunten en oplossingen in Noordoost Friesland en Ameland (Friesland)*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van <https://www.liander.nl/grootzakelijk/transportschaarste/beschikbaarheid-capaciteit/friesland>
- Liander. (2023). *Actuele knelpunten en oplossingen in Noordwest Friesland, Vlieland en Schiermonnikoog (Friesland)*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van <https://www.liander.nl/grootzakelijk/transportschaarste/beschikbaarheid-capaciteit/friesland>
- Liander. (2023). *Actuele knelpunten en oplossingen in Zuidwest Friesland (Friesland)*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van <https://www.liander.nl/grootzakelijk/transportschaarste/beschikbaarheid-capaciteit/friesland>
- Luteijn, G., Bik, K., & van Polen, S. (2021). *Ontwikkelingen in de energierekening to en met 2030. Achtergrondrapport bij de Klimaat- en Energieverkenning 2021*. Den Haag: PBL.
- MET-Support. (2015). *Dutch wave and tidal energy sector*. TKI Wind op Zee.
- Nationale Agenda Laadinfrastructuur. (2023, november 20). *Monitoring Landelijk*. Opgehaald van [agendalaadinfrastructuur.nl](https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/monitoring+2021/monitoring+landelijk/de-fault.aspx): <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/monitoring+2021/monitoring+landelijk/de-fault.aspx>
- Natura 2000. (2023). *Natura 2000 gebieden*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van [Natura2000.nl](https://www.natura2000.nl/gebieden): <https://www.natura2000.nl/gebieden>
- Netbeheer Nederland, ACM, ministerie van EZK, ministerie van BZK, VNG, NP RES, VNO-NCW, VEMW, Energie Nederland en NVDE. (2022). *Landelijk Actieprogramma Netcongestie*.
- North Sea Farmers. (2023). *Offshore test site*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van [northseafarmers.org](https://www.northseafarmers.org/offshore-test-site): <https://www.northseafarmers.org/offshore-test-site>
- PBL, TNO, CBS & RIVM. (2022). *Klimaat- en Energieverkenning 2022*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PDOK. (2023). *Beschikbare netcapaciteit Elektriciteitsnet WMS*. Opgeroepen op Augustus 1, 2023, van [pdok.nl](https://app.pdok.nl/reviewer/#/wms/https:%2F%2Fservice.pdok.nl%2Fkadaster%2Fetcapaciteit%2Fwms%2Fv1_0%3Frequest=GetCapabilities&service=WMS/x=171371.83223001583&y=590454.4835966558&z=5&layers=IndicatiefVerzorgingsgebied%252CAfnameHuidig%253BStations%252C): https://app.pdok.nl/reviewer/#/wms/https:%2F%2Fservice.pdok.nl%2Fkadaster%2Fetcapaciteit%2Fwms%2Fv1_0%3Frequest=GetCapabilities&service=WMS/x=171371.83223001583&y=590454.4835966558&z=5&layers=IndicatiefVerzorgingsgebied%252CAfnameHuidig%253BStations%252C
- Rijkswaterstaat. (2023). *Getij*. Opgeroepen op Juli 27, 2023

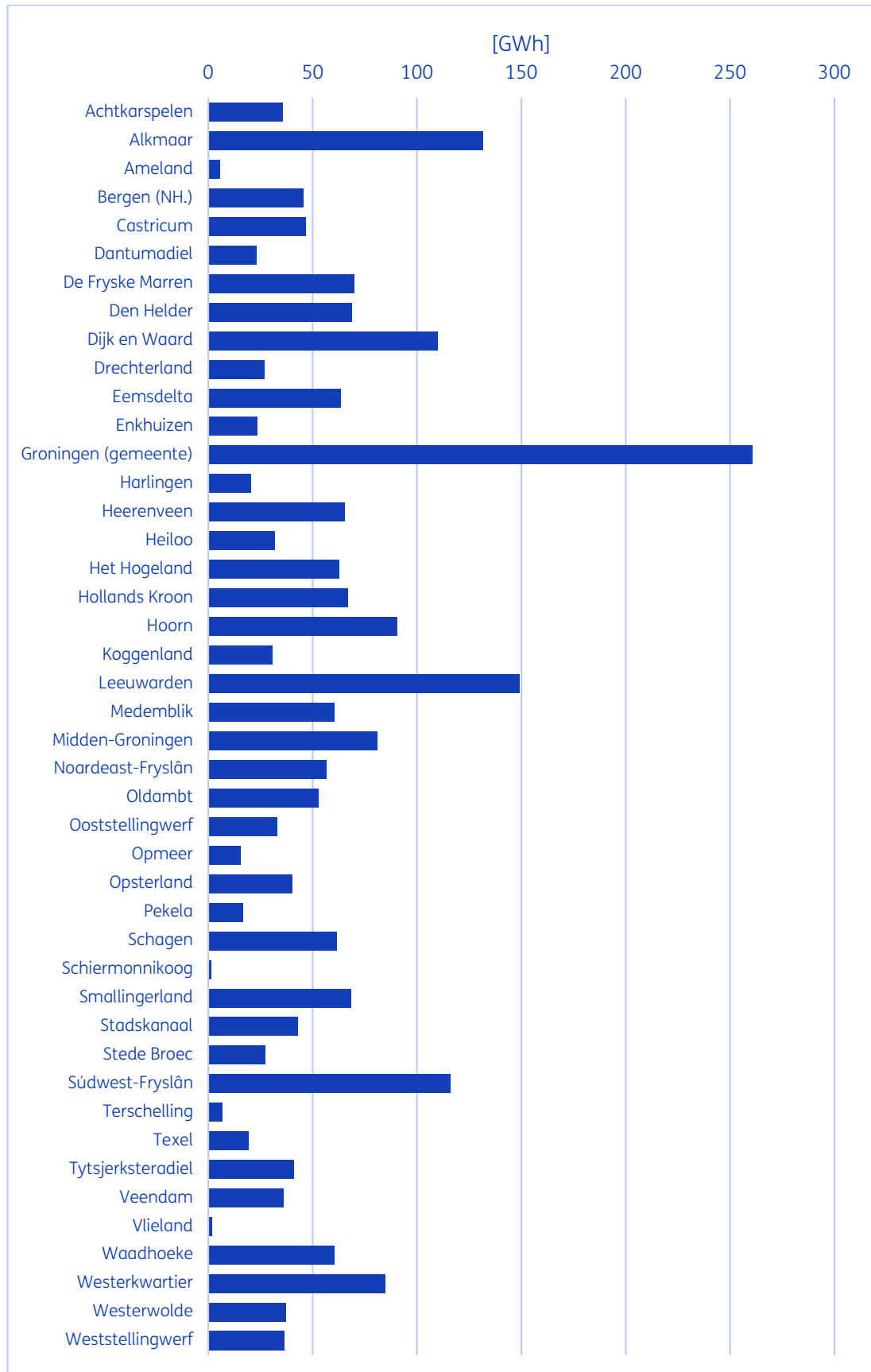
- Rijkswaterstaat. (2023). *Vispassages Afsluitdijk*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van rijkswaterstaat.nl: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/waterkwaliteit/maatregelen-waterkwaliteit/ruim-baan-voor-vis/vispassages-afsluitdijk>
- RVO. (2022). *Protocol Monitoring Hernieuwbare Energie*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.
- SeaCurrent. (2020, juni 9). Interview en reactie op concept factsheet.
- Seenoh. (2023). *Seenoh Tidal Test Sites*. Opgehaald van <https://seeneoh.com/en/home-en/>
- TenneT. (2023). *Netcapaciteitskaart*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van [tennet.eu: https://www.tennet.eu/nl/de-elektriciteitsmarkt/congestiemanagement/netcapaciteitskaart](https://www.tennet.eu/nl/de-elektriciteitsmarkt/congestiemanagement/netcapaciteitskaart)
- TenneT. (2023). *Vooraankondiging congestiemanagement netdeel Friesland*. Opgeroepen op Juli 28, 2023, van [tennet.eu: https://www.tennet.eu/nl/nieuws/vooraankondiging-congestiemanagement-netdeel-friesland](https://www.tennet.eu/nl/nieuws/vooraankondiging-congestiemanagement-netdeel-friesland)
- Tocado. (2020, juni 5). Interview en reactie op concept factsheet.
- van Druten, E., & Kruit, K. (2019). *Perspectieven elektriciteit uit water. Nationaal potentieel voor 2030 en 2050*. Witteveen+Bos en CE Delft.
- Waddenfonds. (2023). *Bijna 5 miljoen van Waddenfonds voor opschaling energiecentrale Afsluitdijk*. Opgehaald van <https://waddenfonds.nl/2023/03/28/bijna-5-miljoen-van-waddenfonds-voor-opshaling-energiecentrale-afsluitdijk/>
- Witteveen+Bos en CE Delft. (2019). *Perspectieven elektriciteit uit water: Nationaal potentieel voor 2030 en 2050*. Deventer: Witteveen+Bos.

Bijlage A

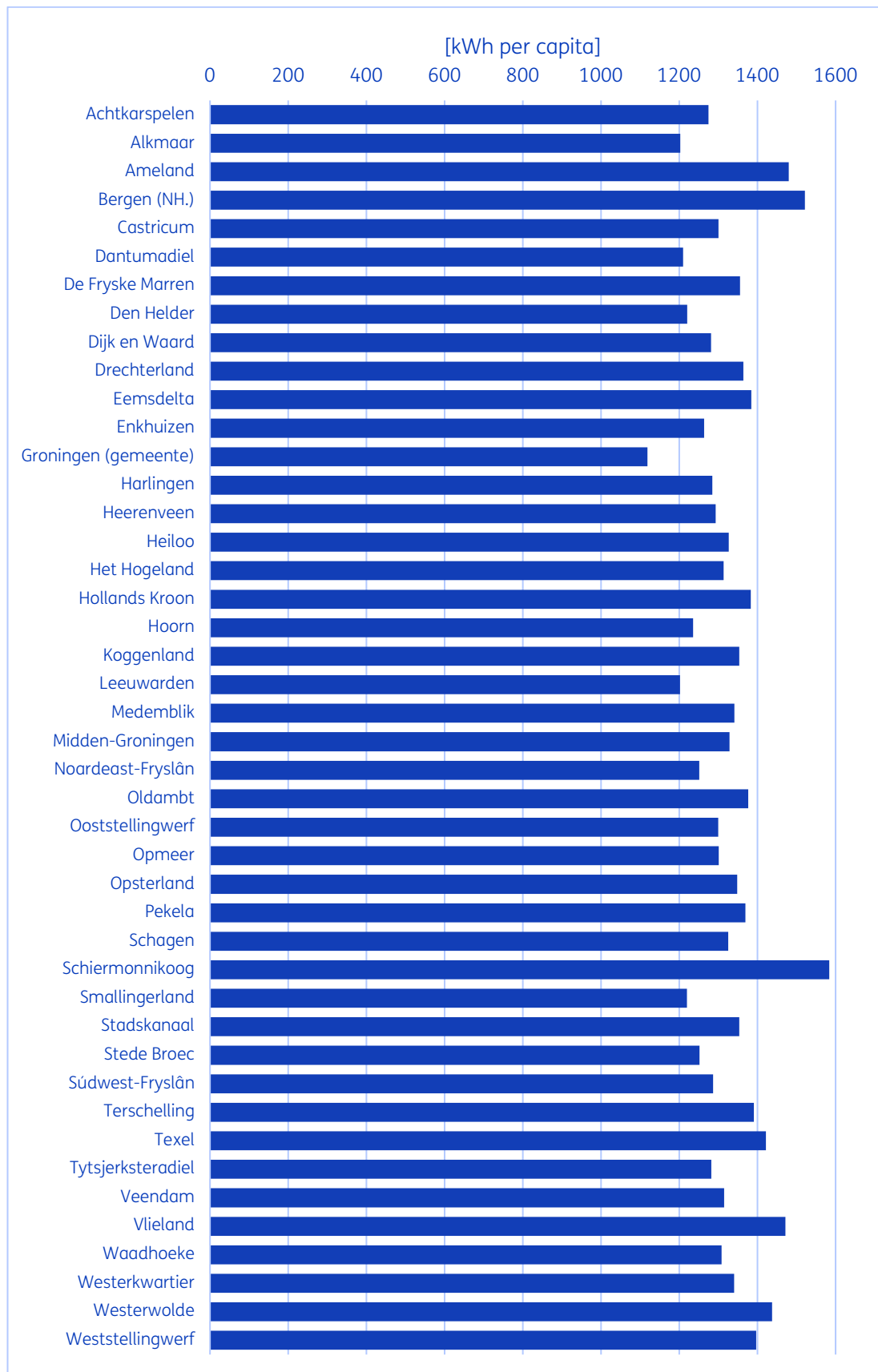
Data per gemeente in het Waddengebied



Figuur A.1: Bevolking per gemeente 2020.



Figuur A.2: Elektriciteitsverbruik van woningen per gemeente 2020.



Figuur A.3: Elektriciteitsverbruik voor woningen per capita per gemeente 2020.

Bijlage B

Vragenlijst

Hieronder staat de vragenlijst die opgestuurd is naar de ontwikkelaars.

Werking van de techniek

1. Geef hier een korte toelichting van de werking van de techniek:
2. Hoe ziet het energieproductieprofiel van één installatie eruit? Wat is de relatie met golfslag, getij(stroming), of stroming zoet water? Lever indien mogelijk een bestand aan met alle (gesimuleerde) uurwaarden van het geleverde elektrische vermogen op een goede locatie in Nederland.
3. Wat is de invloed van stormcondities op de energieproductie van uw ontwerp?
4. Wat is de verwachte jaarlijkse productie per apparaat bij standaardcondities (kWh/MWh/GWh)? Graag ook een duiding van het formaat van de installatie (kW/MW)
5. Wat zijn de energieconversie stappen (bijv. hydrodynamisch naar mechanisch naar elektrisch) die nodig zijn voor uw techniek? Hoeveel rendementsverlies is er per stap?
6. Wat is de benodigde ruimte per apparaat/installatie? (m² oppervlakte, indien mogelijk ook m³ volume)
7. Hoe ziet de werking van meerdere apparaten in een array eruit? Wat is de samenhang tussen de apparaten in een array? Hoe beïnvloedt dit de benodigde ruimte per apparaat uit de vorige vraag?
8. Wat voor materialen zijn er nodig voor de constructie van uw techniek? Denk aan: beton, staal, plastics, bijzondere metalen. Geef graag ook aan of deze in een grote of kleine hoeveelheid nodig zijn (bij voorkeur bijvoorbeeld tonnen staal/beton per installatie of per kW/MW).
9. Is er verdere informatie met betrekking tot de werking van de techniek die u kan of wilt delen?

Opschaling van de techniek

10. Wat is de huidige status van de techniek? (b.v. ontwerpfase, kleinschalige tests, pilot/demonstratie, commerciële operatie). Gebruik hiervoor bij voorkeur de verschillende niveaus van de Technology Readiness Levels (TRL). Wat zijn uw ervaringen tot nu toe met prototypes?
11. Hoe ziet de opschaling van de techniek er in uw ogen uit? In welke stappen gebeurt de opschaling? En hoe veel tijd is er nodig per stap? Welk cumulatief vermogen is haalbaar in Nederland tegen 2030, 2040 en 2050?

12. Welke subsidies zijn er in de beginperiode eventueel nodig? Dekken deze subsidies de complete exploitatie of slechts een deel? Hoe groot is dat deel?
13. Wat is er verder nodig voor de opschaling van de techniek? Denk aan: verbetering van technieken, materialen, extra ruimte, extra fabrieken.
14. Op welke manier is de technologie toegepast in Nederland schaalbaar naar de andere delen van de wereld? Welke gebieden ziet u als kernmarkt?
15. Is er verdere informatie met betrekking tot de opschaling van de techniek die u kan of wilt delen?

Technische inpassing

16. Welke infrastructuur is nodig voor de inpassing van een installatie/array? (aanlanding, kabels, verbinding met het elektriciteitsnet, een energiehubs/eiland, converters, transformatoren, (batterij)opslag, conversiestap (naar waterstof o.i.d.), microgrid etc.).
17. Wat zijn uw inschattingen van de kosten van de benodigde infrastructuur?
18. Kunt u aangeven in welke mate uw techniek kan bijdragen aan netbalancerings? Wat is het aandeel daarvan voor uw businesscase?
19. Wat zijn realistische locaties voor uw installatie binnen het Waddengebied (incl. ~20 km boven de Waddeneilanden)? Waarom is deze locatie volgens u geschikt? Denk aan energetisch potentieel, ecologie, andere gebruiksfuncties, aansluiting op het net, vergunbaarheid, etc.
20. Hoe ziet de inpassing/aanlanding eruit vanuit deze optimale locaties?
21. Is er verdere informatie met betrekking tot de technische inpassing die u kan of wilt delen?

Kosten

22. Wat zijn de investeringskosten en operationele kosten voor een installatie – in de huidige situatie? Graag ook een duiding van het formaat van de installatie (kW/MW) of genormaliseerd in €/kW
23. Hoe zijn de investeringskosten en operationele kosten opgebouwd? E.g. uit welke kostenposten bestaan ze? Denk aan materiaalkosten, installatiekosten, vergunningskosten, kosten aansluiting elektriciteitsnet, onderhoudskosten, loonkosten, etc.
24. Hoe houdt uw ontwerp rekening met het minimaliseren van de operationele en de installatie kosten?
25. Hoe houdt u in uw ontwerp rekening met schaalbaarheid? Kunt u uitleggen hoe opschaling van uw productie kan leiden tot een reductie van kosten per apparaat/installatie?
26. Vanaf welk jaar denk u een rendabele business case te kunnen realiseren? Tegen welke prijs produceert u dan stroom (€/MWh)?

27. Wat zijn jullie verwachtingen van kostendalingen bij opschaling? Welke daling per stap? Wat is er nodig om de daling te realiseren?
28. Hoe verhouden de kosten, kostenopbouw en voorziene kostendaling zich ten opzichte van het beeld in het rapport “Stroom uit water” of de factsheets daarvan? Download link: <https://publications.tno.nl/publication/34637949/RuWtE8/TNO-2020-P11977.pdf>
29. Is er verdere informatie met betrekking tot de kosten die u kan of wilt delen?

Ecologie en andere maatschappelijke baten

30. Wat is uw plan voor het monitoren van ecologische effecten? Welke resultaten kunt u hiervan al met ons delen?
31. Welke ecologische factoren zijn van belang om rekening mee te houden de inpassing van uw installaties?
32. Is het op basis van de huidige beschermingsstatus van de Waddenzee mogelijk om uw installaties te ontwikkelen? Kunt u uitleggen waarom wel of (nog) niet?
33. Wat zijn bekende effecten op het zeeleven van uw installaties?
34. Zijn er materialen benodigd voor uw techniek die bekend staan als giftig voor de leefomgeving? ([Schadelijke stoffen \(lenntech.nl\)](https://www.lenntech.nl/))
35. Zijn er andere maatschappelijke baten waarin uw techniek kan voorzien?
Denk aan: toename schelpdieren (biobouwers), reductie zandsuppletie; toenemende golfdemping- en/of vooroeverwerking, netstabilisatie en kansen voor een combi met andere economische activiteiten: mariene aquacultuur, offshore wind; toerisme e.d.).
36. Is er verder informatie met betrekking tot de ecologie die u kan of wilt delen?

Energy & Materials Transition

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam
www.tno.nl

TNO innovation
for life