



Quicksan milieueffecten offshore waterstofproductie Partiële Herziening Programma Noordzee

Quicksan waterstofproductie Partiële Herziening Programma Noordzee

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

9 mei 2025

Project Quickscan milieueffecten offshore waterstofproductie Partiële Herziening Programma Noordzee

Opdrachtgever Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Document Quickscan waterstofproductie Partiële Herziening Programma Noordzee
Status Definitief 02
Datum 9 mei 2025
Referentie 140780/25-007.352

Projectcode 140780
Projectleider M.R. Plantema, MSc
Projectdirecteur Ing. P.M. Harms

Auteur(s) J.J. van der Endt MSc (ecologie), J.L.G. Eggenkamp MSc (redactie), C. van Erp (redactie)
Gecontroleerd door M.R. Plantema MSc, W. Gotjé MSc
Goedgekeurd door M.R. Plantema MSc

Paraaf 

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
Daalsesingel 51c
Postbus 24087
3502 MB Utrecht
+31 (0)30 765 19 00
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.
© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos, noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Tekst- en datamining van (delen van) dit document, evenals enige verwerking of reproductie ervan door middel van kunstmatige intelligentie technologieën is uitdrukkelijk niet toegestaan, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Dit document (of delen ervan) mag niet worden verveelvoudigd en/of anderszins worden gebruikt op enigerlei wijze voor het trainen van kunstmatige intelligentie technologieën, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	WATERSTOFPRODUCTIE OP ZEE	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Bandbreedte voor technische voorzieningen	2
2	MILIEUEFFECTEN VAN WATERSTOFPRODUCTIE OP ZEE	6
2.1	Milieueffecten	6
2.1.1	Bekende milieueffecten	6
2.1.2	Waterstofspectifieke milieueffecten	7
2.2	Preventieve maatregelen: systeemkeuzes	12
2.3	Mitigerende maatregelen	13
2.4	Alternatieve koelsystemen	13
2.5	Kennisleemten	17
2.6	Conclusies en aanbevelingen	17
2.6.1	Conclusies	17
2.6.2	Aanbevelingen voor toekomstige projecten	18
3	REFERENTIES	21

WATERSTOFPRODUCTIE OP ZEE

1.1 Inleiding

Deze quickscan beschrijft milieueffecten van waterstofproductie op zee. Dit rapport heeft tot doel een kwalitatieve inschatting te maken welke effecten plaatsvinden door waterstofproductie op zee binnen de Partiële Herziening van het Programma Noordzee 2022 - 2027. In tegenstelling tot andere achtergronddocumenten wordt in dit rapport niet vergeleken met de referentiesituatie. Er is op dit moment nog sprake van grote onzekerheid over de hoeveelheid waterstofproductie die nodig en haalbaar is voor de realisatie van de verdere uitrol van wind op zee.

Het doel van waterstofproductie is om een deel van de geproduceerde offshore windenergie op andere wijze (met moleculen) dan via elektronen te kunnen aanlanden. Het elektriciteitsnet heeft naar verwachting onvoldoende capaciteit om in 2032 21 GW, in 2040 50 GW en in 2050 70 GW windenergie te kunnen aansluiten. De geschatte gezamenlijk waterstofproductie van de gebieden Gebied 6/7, Lageland en Doordewind ligt binnen een bandbreedte van minimaal 0 GW (geen waterstofelektrolyse) tot maximaal 10 GW.

Dit document beschrijft eerst welke opstellingen mogelijk zijn, en welke technische systemen nodig zijn voor waterstofproductie. Vervolgens wordt ingegaan op de effecten van de aanleg en gebruik van deze systemen. Grootschalige waterstofproductie- en infrastructuur bestaat echter deels uit nieuwe technieken waarvan een deel van de effecten nog onbekend is. Daarom wordt bij de effectbeschouwing onderscheid gemaakt tussen effecten die bekend zijn, bijvoorbeeld omdat onderdelen van het systeem voor andere doeleinden bekend en bewezen zijn, en (mogelijke) waterstof specifieke effecten waar nog grote kennisleemten over bestaan.

Stand van zaken technologische ontwikkeling en beschikbare kennis

De ontwikkeling van (grootschalige) waterstofproductie op zee is een relatief nieuw en internationaal onontgonnen terrein, met slechts een paar kleinschalige pilotprojecten die tot nu toe zijn uitgevoerd. Deze quickscan bouwt voort op twee relevante studies naar milieueffecten voor middelgrote tot grootschalige waterstofproductie op de Noordzee [bron 1], en het lopende onderzoek voor [demonstratie project 2](#) (Demo 2)). Deze studies, uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei en Gasunie, beschrijven de milieueffecten en kennisleemten van centrale en decentrale opstellingen voor kleinschalige en grootschalige waterstofproductie. Deze kennis is voornamelijk voortgekomen uit bureauonderzoeken en voorstudies, omdat er nog weinig praktijkervaring en praktijkonderzoek beschikbaar is. Naast de twee onderzoeken is de informatie in dit hoofdstuk gebaseerd op en aangevuld met informatie van waterstof- en milieuexperts.

1.2 Bandbreedte voor technische voorzieningen

De technische voorzieningen voor de productie van waterstof op zee kunnen op verschillende manieren worden ontwikkeld. De bandbreedte van mogelijke configuraties is vanuit 2 perspectieven onderzocht:

- 1 opstelling (centraal, semi-centraal en decentraal), geldt zowel voor elektrolyse als compressie;
- 2 systeemonderdelen (waterstofproductie, compressie, verblijfsruimtes, waterstofleidingen, en elektriciteitskabels en substations).

Opstelling

De offshore waterstofsysteem kunnen in drie opstellingen worden geplaatst: centraal (op één platform), semi-centraal (op een aantal platforms), of decentraal (bij de windturbines). In iedere opstelling heeft het waterstofproductiesysteem een andere capaciteit. Onderstaande opsomming geeft per opstelling de bandbreedte van de elektrolyse capaciteit weer, en hoeveel systemen nodig zouden zijn om aan de maximaal benodigde capaciteit (i.e. 10 GW) te voldoen:

- centraal: 500 - 700 MW per waterstofproductieplatform, 16 - 20 platforms;
- semi-centraal: 100 - 200 MW per waterstofproductieplatform, 50 - 100 platforms;
- decentraal: 15 - 25 MW per windturbine, 400 - 665 windturbines.

Een decentrale opstelling leidt in geval van de maximale capaciteit tot de ontwikkeling van honderden waterstofproductie eenheden. Elektrolyse met centrale opstellingen leidt tot zo'n twintig platforms ten behoeve van waterstofproductie eenheden.

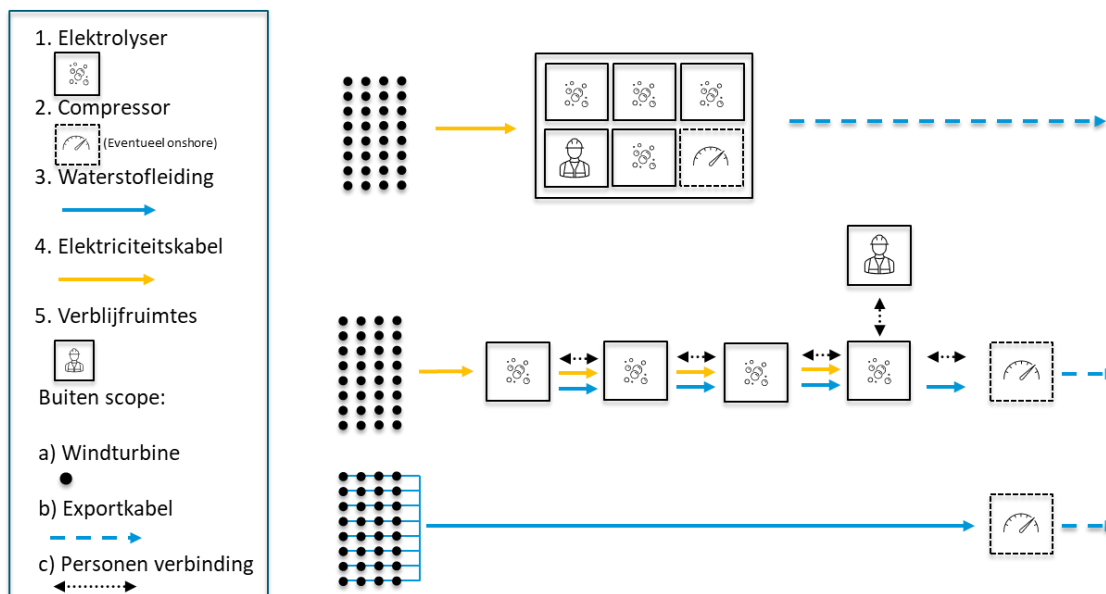
Systeemonderdelen

In totaal zijn er 5 belangrijke onderdelen van het waterstofproductie systeem te onderscheiden die nodig zijn om de geproduceerde waterstof aan te takken op het landelijk waterstofnetwerk, deze **5 hoofdsystemen** zijn:

- 1 elektrolyzers, inclusief koel- en demineralisatiesystemen, en ontluchtings/affakkelsysteem (op platform(s) of in windturbines);
- 2 compressiesystemen (op platform(s) of in windturbines);
- 3 waterstofleidingen (binnen het windpark, export leidingen vallen buiten de scope van deze quickscan);
- 4 elektriciteitskabels (binnen het windpark, exportkabels en substations vallen buiten de scope van deze quickscan);
- 5 verblijfsruimtes (op individueel platform, alleen bij centrale productie).

In Afbeelding 1.1 staan de bovengenoemde systeemonderdelen schematisch weergegeven voor de verschillende opstellingen. Compressie kan ook onshore plaats vinden en is daarom afgebeeld met een gestippelde lijn. De effecten van windturbines zijn buiten scope, behalve de waterstof specifieke milieueffecten.

Afbeelding 1.1 Systeemonderdelen voor een centrale, semi-centrale en decentrale opstelling van circa 500 MW



Tabel 1.1 toont dat, behalve de capaciteit van de elektrolyser, ook de opstelling invloed heeft op de overige systeemonderdelen. Zo is de opstelling bepalend voor de mogelijke systeemopties, zoals het soort koelsysteem. Bijvoorbeeld, bij een centrale opstelling zijn luchtkoeling of een gesloten water koelsysteem nog geen optie. Ook de funderingen verschillen per opstelling, en woonvertrekken op een platform zijn alleen nodig in een (semi-)centrale opstelling omdat een offshore compressieplatform nog dagelijkse bemanning vereist.

Tabel 1.1 Bandbreedte voor technische voorzieningen per opstelling voor maximaal 10GW waterstofproductie

Hoofd-systeem	Subsysteem	Systeemopties	Centraal	Semi-centraal	Decentraal
1	elektrolyser	capaciteit per platform/turbine	500 - 700 MW	100 - 200 MW	15 - 25 MW
1	elektrolyser	aantal platforms/turbines voor max. benodigde capaciteit	16 - 20	50 - 100	400 - 665
1	soort koelsysteem	water (w), lucht (l), hybride (h)	w, h	w, h	w, l, h
1	soort demiwater productiesysteem	open (o) of gesloten (g) omgekeerde osmose (r), chemische (c), thermische (t) demineralisatie	o r, c, t	o, g r, c, t	o, g r, c, t
1	mogelijkheden voor overtollig waterstof	affakkelen (a), ontluichten (o)	a, o	a, o	a, o
1	soort fundatie van turbines	XXL monopile (XXL MP), jacket (J);	n.v.t.*	n.v.t.*	XXL MP of J
2	locatie compressie	onshore (a), offshore op platform (b), offshore in turbine (c)	a, b	a, b	a, b, c
5	locatie woonvertrekken	service operation vessel (SOV), op platform (p)	SOV, p	SOV, p	SOV

Hoofd-systeem	Subsysteem	Systeemopties	Centraal	Semi-centraal	Decentraal
1, 2, 5	soort fundatie van platforms (waterstofproductie, compressor, woonvertrekken)	indicatieve massa topside**	20.000 - 30.000ton	< 10.000ton	n.v.t.
		platform: jacket, suction bucket, gravity-based, XXL-monopile;	x	x	n.v.t.
		bridgelinks;	n.v.t.	x	n.v.t.
		erosiebescherming;	x	x	n.v.t.

* Niet onderscheidend ten opzichte van traditioneel windpark zonder waterstofproductie.

** Deel op de fundatie. Een 'x' betekent dat ten minste één van de genoemde systeemopties voor kan komen in de desbetreffende opstelling.

De verschillende opstellingen van waterstofproductie hebben verschillende bijbehorende eigenschappen, zoals omvang of aantallen van de systeemonderdelen zoals vermeld in Tabel 1.2. Deze eigenschappen zijn in per onderdeel en per opstelling gespecificeerd als 'laag', 'medium' of 'hoog', ten opzichte van elkaar. Bij de vergelijking van centrale, semi-centrale en decentrale opstellingen zijn er duidelijke verschillen binnen een windgebied te identificeren. Zoals Tabel 1.1 aangeeft zijn niet alle subsystemen nodig voor elke opstelling. In dat geval staat er 'n.v.t.'. De verschillen tussen de opstellingen voor compressieplatforms, waterstofleidingen, elektriciteitsleidingen en verblijfsruimten zijn ook in Tabel 1.2 weergegeven.

Centrale opstellingen kenmerken zich door een klein aantal geconcentreerde koel- en productiewater innamepunten, en warmte- en chemicaliënpluimen (zie paragraaf *Effecten van chemicaliën*), een beperkt aantal affakkelpunten, en minder fundaties voor platforms. Semi-centrale opstellingen hebben een middelgroot aantal koel- en productiewater innamepunten, en warmte- en chemicaliënpluimen, affakkelpunten en fundaties voor platforms. Decentrale opstellingen hebben luchtkoeling, of verspreide warmte- en chemicaliënpluimen, een hoog aantal ontluuchting- of affakkelpunten en zwaardere fundaties ten opzichte van traditionele wind turbines.

Tabel 1.2 Verschil in eigenschappen van subsystemen tussen opstellingen in windgebied. De tabel is van links naar rechts leesbaar, vanaf het hoofdsysteem (zie systeemonderdelen), het subsysteem en de eigenschap van dit subsysteem. Rechts naar de stippellijn geeft aan hoe de opstellingen zich tot elkaar verhouden op de gegeven eigenschap. De eerste regel geeft aan: de elektrolyseer heeft koelsystemen met innamepunten, waarbij een centrale opstelling een lager aantal innamepunten heeft dan semi-centraal en decentraal

Hoofd-systeem	Subsysteem	Eigenschap	Centraal	Semi-centraal	Decentraal
1	koelsysteem (open, water)	aantal koel- en productiewater innamepunten	laag	medium	hoog
1	koelsysteem (open, water)	debiet per platform/turbine van koel- en productiewater innamepunten	hoog	medium	laag
1	koelsysteem (open, water)	verdeling in gebied van koel- en productiewater innamepunten	geconcentreerd	semi verspreid	verspreid
1	koelsysteem (open, water)	aantal warm water lozingspunten	laag	medium	hoog
1	koelsysteem (open, water)	verdeling in gebied van warm water lozingspunten	geconcentreerd	semi-verspreid	verspreid

Hoofd-systeem	Subsysteem	Eigenschap	Centraal	Semi-centraal	Decentraal
1	koelsysteem (open, water)	aantal chemicaliën lozingspunten	laag	medium	hoog
1	koelsysteem (open, water)	verdeling in gebied van chemicaliën lozingspunten	geconcentreerd	semi-verspreid	verspreid
1	fundatie	aantal fundaties voor platform(s)	laag	medium	n.v.t.
1	fundatie	omvang t.o.v. fundatie van traditionele windturbine	n.v.t.	n.v.t.	medium - groot ¹
1	gaslozing (H ₂ & O ₂)	aantal ontluchting/ affakkelpunten	laag	medium	hoog
2	fundatie	aantal fundaties voor platform	laag	laag	n.v.t. - laag
2	compressor	aantal geluid en trillingen producerende systemen	laag	laag	laag - hoog
3	-	aantal leidingen binnen windpark (IA ²)	n.v.t.	laag	hoog
4	-	aantal kabels binnen windpark (IA)	hoog	hoog	n.v.t.
5	-	aantal platforms binnen windpark	laag	laag	n.v.t.

¹ Om een elektrolyser bij een windturbine te kunnen installeren is een grotere monopile of een jacket constructie nodig om het extra gewicht van het elektrolyser systeem te kunnen ondersteunen.

² IA: Inter-array. Dit zijn de kabels of leidingen binnen het windpark, van de windturbines naar het transformator- of compressorplatform.

MILIEUEFFECTEN VAN WATERSTOFPRODUCTIE OP ZEE

De ingrepen en/of activiteiten ten behoeve van offshore waterstofproductie hebben bijbehorende milieueffecten. Deze milieueffecten worden in dit hoofdstuk beschreven. Bij de bekende milieueffecten is te bepalen wat de milieueffecten en de grootte daarvan zijn ten gevolge van de keuze voor een centrale, semi-centrale of decentrale opstelling. Over aan waterstofproductie gerelateerde specifieke milieueffecten zijn nog veel leemten in kennis en is het vaak lastig om de daadwerkelijk effecten te duiden.

2.1 Milieueffecten

2.1.1 Bekende milieueffecten

Een aantal milieueffecten van offshore waterstofproductie zijn vergelijkbaar met die van windturbines, offshore substations, en olie- en gasplatforms/leidingen. In deze paragraaf worden deze milieueffecten omschreven voor de bouw- en verwijderingsfase en de gebruiksfase. Daarnaast worden de milieueffecten vergeleken per opstelling.

Bouw- en verwijderingsfase

De bouw en de verwijdering van windturbines en/of platforms voor waterstofproductie zijn vergelijkbaar met die van traditionele windturbines, elektrische offshore substations, en/of olie- en gasplatforms. Denk aan transport met diverse typen schepen, het heien van fundaties, het plaatsen van de opbouw en het aanbrengen van erosiebescherming. Het installeren van waterstofleidingen binnen het windpark is vergelijkbaar met en/of bekend van het installeren van aardgasleidingen.

Relevante effecten van de werkzaamheden in de bouw- en verwijderingsfase zijn (onderstaande opsomming is niet uitputtend):

- onderwatergeluid als gevolg van heien, wat kan leiden tot verstoring of sterfte van vissen en/of zeezoogdieren;
- verstoring in de vorm van licht, geluid en fysieke aanwezigheid van schepen en funderingen;
- vertroebeling als gevolg van aanlegwerkzaamheden voor platforms, kabels, en leidingen;
- verstoring van de bodem door het aanbrengen van hard substraat;
- habitatverlies als gevolg van het aanleggen van constructies.

Hoe meer platformen er moeten worden aangelegd, des te meer effecten er verwacht mogen worden in de bouwfase. Centrale opstellingen hebben door hun kleinere aantal op minder plaatsen effecten dan semi-centrale opstellingen. Bij decentrale opstellingen wordt gebruik gemaakt van de fundaties van windturbines. Deze fundaties zijn in aantal niet groter dan in de (semi-)centrale opstelling, echter de fundaties zullen zwaarder moeten worden uitgevoerd. Hierdoor zal de aanleg hiervan naar verwachting ook meer verstoring per fundatie veroorzaken. Kabels en/of leidingen zijn in alle opstellingen aanwezig.

Gebruiksfase

Ook tijdens de gebruiksfase zijn veel werkzaamheden vergelijkbaar met andere platforms op zee. Voor het onderhoud van de offshore waterstofsysteem zijn schepen en helikopters benodigd, net als voor het onderhoud van een traditioneel offshore windpark en substation. De nautische veiligheidseffecten, en onderzoeksmethoden zijn nog niet geheel bekend voor waterstofproductie. Er ontbreken nog duidelijke veiligheidsnormen en richtlijnen voor waterstofproductie op de Noordzee.

Relevante effecten in de gebruiksfase zijn (onderstaande opsomming is niet uitputtend):

- verstoring in de vorm van licht, geluid en fysieke aanwezigheid van platforms en schepen;
- effecten van elektromagnetische velden (EMV) van kabels;
- aanwezigheid van hard substraat (funderingen, kruisingen met kabels en leidingen (op de bodem), en platformen (in de waterkolom));
- aanvaring, verstoring, en habitatverlies vogels met turbines.

Een semi-centrale opstelling heeft een groter ruimtegebruik dan een centrale opstelling en zorgt dus voor meer verstoring door licht en aanwezigheid van hard substraat. Effecten van EMV zijn het kleinst voor een decentrale opstelling omdat er geen elektriciteitskabels binnen het windpark liggen. Tenslotte, aanvaringsslachtoffers zijn niet onderscheidend ten aanzien van het windpark. Voor de verschillende opstellingen is de kans op additionele aanvaringsslachtoffers afhankelijk van de omvang en het aantal platforms.

2.1.2 Waterstofspectifieke milieueffecten

Met waterstofspectifieke milieueffecten wordt bedoeld dat deze specifiek zijn voor waterstofproductie op zee en niet vergelijkbaar zijn met effecten van vaak voorkomende andere offshore activiteiten of constructies. Waterstofproductie op zee is een activiteit die nog niet eerder op (middel)grote schaal is uitgevoerd.

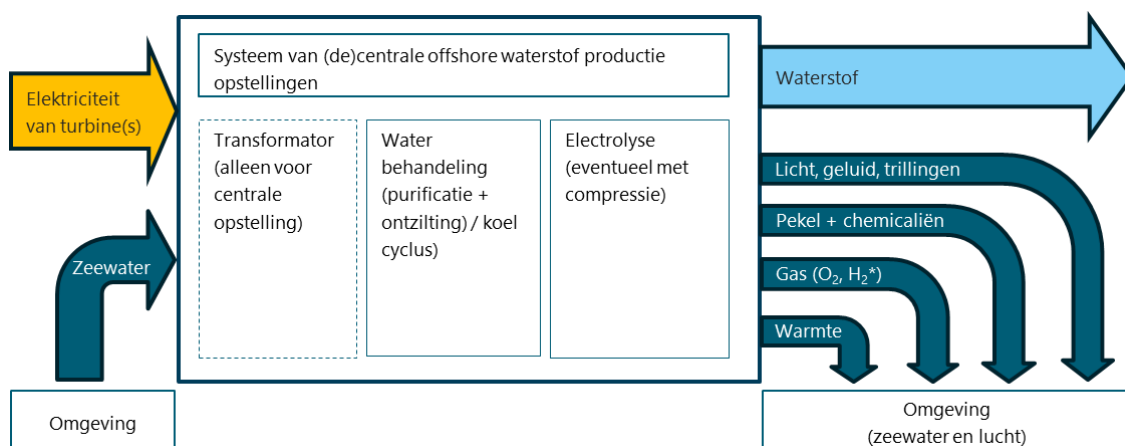
Gebruiksfase

De belangrijkste waterstofspectifieke milieueffecten treden op tijdens de gebruiksfase. Deze effecten zijn in deze paragraaf beschreven. Waterstofspectifieke effecten zijn onder te verdelen in ecologische effecten en overige milieueffecten. Alleen de milieueffecten die nieuw of groter zijn bij waterstofproductie en transport dan bij bekende offshore activiteiten, zijn hier benoemd.

In Afbeelding 2.1 is schematisch het waterstofproductieproces weergegeven inclusief de interacties met het milieu (de pijlen geven geen indicatie van schaal aan). Elektriciteit en (zee)water zijn nodig voor de productie van waterstof (lichtblauwe pijlen). In dit proces vindt, afhankelijk van de opstelling en het systeem, visintrek in het systeem plaats, en komen warmte, pek (water met verhoogd zoutgehalte), chemicaliën, gasemissies, licht, en geluid vrij (donkerblauwe pijlen). Dit leidt mogelijk tot effecten in de omgeving. De ecologische en overige milieueffecten worden aan de hand van deze afbeelding hierna beschreven.

Afbeelding 2.2 Schematische weergave van interactie tussen milieu en offshore waterstofproductie, weergegeven als 'black box'.

*Waterstof wordt incidenteel (tijdens onderhoud of als voorzorgsmaatregel) afgefaakt, er is dus geen continue stroom van waterstof naar de atmosfeer



Ecologische effecten

Effecten van wateropname

Koelwater (bij open koelsystemen) en productiewater worden opgenomen uit zee. Bij open koelsystemen wordt tijdens de waterstofproductie uit de zee water opgenomen, voorzien van reinigingschemicaliën (anti-fouling), opgewarmd, gemengd met afgescheiden zout, en weer geloosd in zee. De opname van productiewater is een fractie van het benodigde koelwater. Waterinname van een opstelling met een gesloten koelsysteem voor productiewater is dus vrijwel nihil vergeleken met de continue koelwaterinname van een opstelling met een open koelsysteem.

De inname en het gebruik van koel- en productiewater gaat ten koste van marien leven. Het gaat onder meer om plankton, zoals fytoplankton en zoöplankton, waar naast eencellige organismen ook viseitjes en vroege levensstadia van bodemdieren onder vallen. Sterfte hiervan is vanwege de grootte (van enkele μm tot enkele cm) en het gedrag (geen tot zeer beperkte mogelijkheid om weg te zwemmen) eigenlijk niet te voorkomen dan wel te mitigeren. Het ecologische effect van deze waterinname is een kennisleemte en hangt af van technische, hydrodynamische en ecologische factoren. Zo spelen (jaarlijkse) innamevolumes, diepte van de innamepunten, de ruimtelijke opstelling (centraal versus decentraal) een rol in de mate van het effect.

Daarnaast hebben hydrodynamische factoren zoals stroming en stratificatie effect op de aanwezigheid van soorten in de waterkolom en rond de innamepunten. Dit beïnvloedt welke soorten worden opgenomen en daarmee wat het effect is op het ecosysteem. Effecten niet op voorhand uit te sluiten. Dit geldt bijvoorbeeld bij grote inname capaciteit, of als waterinname zich bij alle installaties slechts concentreert op één diepte (bijvoorbeeld alleen de bodem of het oppervlak). Hierdoor kan een specifieke selectiedruk ontstaan, met mogelijk negatieve effecten.

Tevens kan er ook inname van macrofauna plaatsvinden. Hierbij moet vooral gedacht worden aan soorten die in de waterkolom leven, zoals vrijzwemmende kleine dieren zoals vislarven of larvale stadia van bodemdieren, en niet aan dieren die op de bodem zelf leven. De kans op mortaliteit wordt met name bepaald door de stroomsnelheid bij het innamepunt en of maatregelen worden genomen om visintrek in het systeem te beperken. De mortaliteit wordt daarmee sterk bepaald door het gebruikte systeem en het specifieke ontwerp daarvan, waardoor er momenteel geen uitspraak kan worden gedaan over grootte van de ecologische effecten. Mitigatie van effecten op macrofauna is derhalve wel mogelijk.

Wanneer er geen koelwater wordt gebruikt (bij luchtkoeling bijvoorbeeld), is de opname van water veel lager (10 tot 100 keer, [1]), omdat dan alleen nog water nodig is voor het primaire elektrolyseproces. In dat geval zijn mogelijke effecten van wateropname dus ook veel kleiner. Het is lastig te voorspellen wat het verschil in effect is bij meer centrale of meer decentrale opstellingen. Voor een centrale opstelling met een enkele elektrolyser van 500-700MW is bijvoorbeeld een koelwaterstroom nodig van 10.000-30.000 m^3 per uur. De benodigde koelwaterstroom hangt van verschillende factoren af, zoals van de omvang van de warmtewisselaar en het ontwerp-temperatuurverschil (ΔT) tussen ingaande en uitgaande koelwaterstroom. Een hogere ΔT leidt tot een lager benodigd koelwatervolume.

Hoe de warmtepluim zich vervolgens gedraagt, is zeer complex. Op welke wijze deze zich vormt en gedraagt hangt af van lokale stroming, snelheid van menging, stratificatie, enzovoort. Hetzelfde geldt voor decentrale koelwaterstromen, waardoor hierover op dit moment nog geen eenduidige conclusies te trekken zijn. In geval van (gedeeltelijke) luchtkoeling is veel minder of geen koelwater nodig, echter is luchtkoeling in veel gevallen om technische of veiligheidsredenen niet haalbaar.

Verwacht mag worden dat concentratie van negatieve effecten op 1 punt (centrale systemen) in totaal minder effecten zal opleveren door sterfte dan een optelling van relatief kleinere effecten op een veelvoud van punten (decentrale systemen). Ook mitigatie van effecten is beter beheersbaar bij centrale systemen dan bij decentrale systemen. Bij een centraal systeem zijn alle operaties en de bijbehorende milieueffecten geconcentreerd op 1 locatie. Dit maakt het eenvoudiger om maatregelen te ontwerpen en te implementeren die de negatieve effecten beperken. In plaats van meerdere locaties in de gaten te houden en aan te passen, kan men zich richten op 1 plek.

Effecten van warmte

Bij de productie van waterstof komt warmte vrij. De hoeveelheid warmte die vrijkomt is afhankelijk van hoe efficiënt het productieproces is. Momenteel wordt uit gegaan van ongeveer 30 % warmteverlies (ten opzichte van de ingaande energie), maar dit kan in de toekomst beter worden (minder warmteverlies). Daarbij is het zo dat een centraal systeem waarschijnlijk efficiënter is dan een decentraal systeem, vanwege de grotere schaal van de systemen.

Warmteafgifte aan de lucht

Bij luchtkoeling wordt warmte afgegeven aan de lucht in de omgeving. Dit is op korte termijn waarschijnlijk alleen een technisch haalbare koelingsoptie bij een decentrale opstelling. Bij offshore waterstofsysteem van meer dan 30 MW is een groot koeloppervlak nodig, dat is lastig in te passen op een platform. Het is onwaarschijnlijk dat deze (lokale) warmtebronnen tot ecologische effecten leiden. Bij opschaling van waterstofproductie met decentrale opstellingen is het dus waarschijnlijk technisch mogelijk om ecologische effecten door warmtelozing te vermijden door luchtkoeling te gebruiken. Dit is echter nog niet nader onderzocht.

Warmteafgifte aan water

De warmte wordt afgegeven aan de omgeving. Zowel bij een open als bij een gesloten koelsysteem wordt de warmte aan het koelwater afgegeven, waarna de warmte zich verspreid en verdwijnt in het (koudere) zeewater. Voor een centrale opstelling met een elektrolyser van circa 500 MW en waterkoeling (zie onderstaand kader [1]) is de benodigde waterstroom voor het waterkoelsysteem aanzienlijk (40 tot 100 keer) groter dan het watervolume nodig voor de waterstofproductie zelf (zie ook de paragraaf effecten van pekel). De hoeveelheid water die nodig is voor koeling van een vermogen aan warmteproductie (Q) in Watt wordt in sterke mate bepaald door het verschil in temperatuur bij opname en afgifte (ΔT). Deze ΔT is een ontwerpkeuze. Bij een grote ΔT , is er minder koelwater nodig. Hiervoor geldt een lineair verband: bij een verdubbeling van de ΔT (van bijvoorbeeld 5°C naar 10°C), halveert de benodigde koelwatervolumestroom ($\dot{m}$) in m³/seconde.

De formule die voor een open koelsysteem geldt is $Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$. In deze formule is te zien dat bij constant vermogen Q , de massastroom $\dot{m}$ en temperatuurverschil ΔT elkaar volgens een lineair verband omgekeerd evenredig beïnvloeden. c_p is de soortelijke warmtecapaciteit bij constante druk (J/kg·°C).

De temperatuur van zeewater is een belangrijke abiotische factor die de aanwezigheid van flora en fauna beïnvloedt, zoals de productiviteit van algen (fytoplankton). Soorten hebben ook verschillende tolerantieniveaus voor temperatuurvariaties. Dit verschilt bovendien voor veel soorten per seizoen. Veranderingen in de omgevingstemperatuur door warmtelozingen kunnen de tolerantieniveaus van bepaalde soorten overschrijden, wat kan leiden tot verminderde fysiologische werking, verplaatsing of sterfte.

Momenteel doet de Gasunie onderzoek naar de effecten van een centrale opstelling van circa 500 MW¹. De resultaten van deze studie zijn nog niet openbaar beschikbaar. Gezien de volumes die nodig zijn voor koeling van deze demo en de lokale stroomsnelheid in Windenergiegebied Ten Noorden van de Waddeneilanden, zouden negatieve effecten door warmtelozing waarschijnlijk beperkt zijn. Echter zijn de effecten van opschaling naar 10 GW waterstofproductie en de mogelijke langetermijneffecten van (grootschalige) warmtelozing nog erg onzeker.

Verwacht kan worden dat kleine decentrale oplossingen leiden tot minder hoge pieken en minder verspreiding van de warmte in het water dan bij 1 hele grote centrale opstelling. Daarvan uitgaande zou een centrale opstelling dus grotere risico's met zich meebrengen dan een opstelling met kleine decentrale systemen. Mogelijk geldt hetzelfde voor effecten op verstoring van warmte gelaagdheid in het zeewater door aanvoer van warm water. Hoe meer warmte aanvoer des te groter de kans op verstoring. Ook dan geldt dus dat kleine decentrale opstellingen de voorkeur hebben boven grote centrale systemen.

¹ Zie: [Gasunie: betrokken bij 500MW demonstratieproject waterstofproductie op zee \(Demo II\)](#).

In opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei is een voorstudie [1] uitgevoerd naar de globale milieueffecten van alternatieven voor middelgrote (Demo I, circa 50 MW) en grootschalige waterstofproductie op zee (Demo II, circa 500 MW)¹. Hierbij is uitgegaan van een PEM-elektrolyser en een open koelsysteem op basis van zeewater ('once through'). Er is zowel gekeken naar een centrale opstelling op een platform als naar een decentrale opstelling in windturbines. Voor waterstofspectifieke en niet-waterstofspectifieke zijn milieueffecten en kennisleemten in kaart gebracht. In het onderzoek was een open koelsysteem aangenomen. Voor het temperatuurverschil tussen de in- en uitgaande waterstroom was 5 graden Celsius ($\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$) gehanteerd. Deze aanname was gebaseerd op een bestaande energiecentrale met rivierkoeling. (Er zijn ook voorbeelden van systemen met een groter temperatuurverschil, zoals $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$). Voor offshore waterstofproductie is het nog te vroeg om richtwaarden voor het temperatuurverschil vast te stellen. De mate van opwarming is afhankelijk van de lokale stroming en moet vooraf nauwkeurig worden gemodelleerd en geanalyseerd.

Effecten van pekel

Voor de productie van waterstof wordt water gebruikt, dat voorafgaand aan het proces moet worden ontzilt en gezuiverd. Het restwater dat hierbij vrijkomt, heeft een verhoogde zoutconcentratie (saliniteit) en wordt pekel genoemd. Dit restwater wordt bij waterstofproductie in zee geloosd.

Water met een hogere saliniteit kan schadelijk zijn voor mariene soorten. Wanneer pekel sterk mengt met het zeewater, zullen nadelige effecten zeer beperkt zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een open koelsysteem, waarbij de pekel met het koelwater gemengd wordt. In andere gevallen vindt deze menging minder goed plaats, vanwege het dichtheidsverschil tussen pekel en regulier zeewater. Omdat pekel zwaarder is dan regulier zeewater, zal deze pluim naar de bodem zakken, wat waarschijnlijk gevolgen zal hebben voor de benthische gemeenschap dicht bij de bron van de lozing. Ook komt daarmee relatief warm water op de zeebodem terecht. Over het algemeen is de zeebodem kouder dan het oppervlak. Daarmee heeft lozing van zout water ook invloed op de bodemtemperatuur.

Uitgaande van grote volumes restwater en de relatief sterke stroming in de Noordzee, zal pekel zich snel vermengen en verdunnen met omliggend aangevoerd zeewater. Bij een decentrale opstelling, met veel afzonderlijke uitstroompunten, is deze kans op verdunning groter omdat de uitstroom ook relatief laag is. Bij grootschalige waterstofproductie vanaf één enkel platform zal er minder snel verdunning optreden omdat de uitstroom volumes beduidend groter zullen zijn. Desalniettemin wordt verwacht dat de menging vooral wordt bepaald door de aanvoer van 'natuurlijk' zeewater en niet door de uitstroom van zout water. De volumes die via stroming van zeewater bij de installatie aankomen zijn immers veel groter dan de volumes pekelwater die uitstromen uit de systemen, ongeacht de grootte van de systemen.

Effecten van chemicaliën

De zuivering van het productiewater kan geschieden via omgekeerde osmose. Een andere optie voor zuivering is om chemicaliën te gebruiken. Op dit moment is er weinig inzicht in welke chemicaliën dit zijn, of deze af te voeren zijn of dat deze geloosd gaan worden. Chemicaliën voor waterzuivering en mogelijke samenhangende effecten zijn nog niet onderzocht. Onbekend is in hoeverre deze chemicaliën na gebruik afgescheiden kunnen worden, dan wel in het afvalwater terecht komen.

Daarnaast zal geloosd water mogelijk anti-fouling chemicaliën bevatten. Dit zijn chemicaliën om het interne leidingwerk vrij te houden van mariene aangroei zoals algen, zeepokken, mosselen en ander klein biologisch materiaal. Dergelijke aangroei is een bekend en veelvoorkomend probleem in zowel zout- als zoutwatersystemen. Bij een conventioneel anti-fouling systeem zal chloor worden vermengd met het koelwater. Dit leidt tot directe mortaliteit in het koelwater, wat ook het doel is van de anti-fouling. Echter, als de concentratie chloor en toxische bijproducten bij afgifte in het zeewater te hoog is, leidt dit ook tot mortaliteit van soorten in het zeewater.

¹ Zie: [Preliminary study on the environmental effects of hydrogen production at sea](#).

Er zijn nog onzekerheden over de effecten van anti-fouling chemicaliën, vooral omdat de uiteindelijke concentraties van schadelijke bijproducten in zeewater afhankelijk zijn van waterkwaliteit van inname water (bijvoorbeeld opgelost organisch materiaal) en de mate van verdunning. Voor zeewater geldt met name dat deze hoge gehalten aan haliden bevat, wat invloed heeft op concentratie van broom en jodide. Onder invloed van stoffen zoals chloor kunnen deze leiden tot toxische producten zoals bromoform [2]. De meeste toxicologische onderzoeken zijn gericht op acute mortaliteit van plankton, in een laboratoriumopstelling, en op zoetwatersystemen. Onderzoek naar langdurige, grootschalige afgifte van anti-fouling chemicaliën rond installaties op zee ontbreekt.

Bij luchtkoeling of waterkoeling met een gesloten systeem wordt een groot deel van de effecten van chemicaliën weggenomen. Bij gesloten waterkoeling vindt warmteafgifte naar zeewater plaats via een buisleiding, waardoor er geen sprake is van inname en lozing van koelwater.

Normen en richtlijnen voor lozing van chemicaliën op zee

In het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) zijn regels opgenomen over milieubelastende activiteiten. Voor een elektrolyseplatform en alle andere milieubelastende activiteiten die daar bij horen is een omgevingsvergunning milieubelastende activiteit nodig. Voor het verlenen van deze vergunning moet het bevoegd gezag beoordelen of de lozingen aanvaardbaar zijn. Hiervoor zijn geen normen opgenomen in het Besluit activiteiten leefomgeving. Wel geldt op grond van artikel 7.6 een zorgplicht, op basis waarvan de initiatiefnemer nadelige gevolgen van de lozing zoveel mogelijk moet voorkomen, beperken, ongedaan moet maken of zelfs achterwege moet laten.

Voor lozingsactiviteiten is daarnaast bepaald dat de beste beschikbare technieken moeten worden toegepast. Ook hiervoor zijn voor lozingen van een waterstofplatform nog geen richtlijnen. Het is dus aan de initiatiefnemer om aan te tonen dat is gekozen voor de beste beschikbare technieken. Daarbij is het belangrijk om goed te beschrijven welke opties er zijn, en waarom de gekozen optie de beste techniek is. Omdat deze techniek nieuw is, is het raadzaam om een uitgebreide en duidelijke beschrijving op te nemen, om het bevoegd gezag goed te informeren en veel vragen van het bevoegd gezag te voorkomen.

Effect van geluid tijdens de gebruiksfase

De productie van waterstof is geen proces met grote geluidsproductie. Echter zijn er wel andere delen van het proces met relatief veel geluidsproductie. Bij de productie van waterstof veroorzaken de pompsystemen wateropname tot onderwatergeluid en trillingen. De omvang hiervan is beperkt: het zal niet leiden tot directe sterfte (bijvoorbeeld door schade aan zwemblazen) of tot gehoorverlies door gehoorschade. Er is geen sprake van lethale geluidsniveaus of gehoorbeschadiging.

Wel kan de productie van waterstof tot een verhoging van het achtergrondgeluid onderwater leiden, waardoor verstoring van voor geluid gevoelige soorten kan optreden. Hierdoor zouden soorten het gebied kunnen gaan mijden. De omvang van dit gebied is afhankelijk van het pomptype en de omvang van de verhoogde geluidsniveaus en de frequentiesamenstelling hiervan, en de mate van reeds aanwezig achtergrondgeluid op de locatie. Ook is de geluidsfrequentie die onderwater wordt opgewekt van belang bij de reikwijdte van de effecten: lage bromtonen reiken verder dan hogere tonen.

Bovenwater is het grootste geluidseffect te verwachten van de compressor. Wanneer compressie op land plaatsvindt, dan is dit een geluidsbron die op land een effect heeft; waarbij geluid op land minder ver draagt dan op water. Geluidseffecten op land zijn bovendien makkelijker beter te mitigeren dan in het zeewater. Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat tot op heden weinig onderzoek is gedaan naar specifiek compressie van waterstof op land, maar dat over effecten van geluid op land (en mitigatiemogelijkheden) wel veel bekend is.

Bij alternatieve koelsystemen zoals een gesloten koelsysteem of luchtkoeling is geen toevoer van water nodig, waardoor het gebruik van grote pompsystemen en daarmee emissies van onderwatergeluid en trillingen verminderd of geheel vermeden kunnen worden.

Effecten van gaslozing (O₂ en H₂)

Tijdens waterstofproductie wordt het zeewater gesplitst in waterstof en zuurstof (O₂). De zuurstof wordt uitgestoten naar de omgeving. Er zijn geen negatieve milieueffecten geïdentificeerd voor deze handeling.

Wanneer er in de operationele fase onderhoud aan de elektrolyzers of de waterstofleidingen gepleegd dient te worden, kan het noodzakelijk zijn om de waterstof uit de waterstofleidingen te verwijderen. De waterstof in de leidingen kan worden geventileerd naar de omgeving, maar omdat waterstof een indirect broeikasgas is, heeft het de voorkeur om de waterstof af te fakkelen. Het effect van het affakkelen van waterstof is een kleurloze vlam. Deze vlam kan een gevaar vormen voor langs vliegende vogels. Gepland onderhoud vindt bij voorkeur overdag plaats. Deze vlam zal dus slechts sporadisch, en voornamelijk overdag, aanwezig zijn.

In geval van nood kan alle aanwezige waterstof in de leidingen worden geventileerd naar de omgeving. Omdat waterstof een licht gas is zal het snel vervliegen in de omgeving. Dit heeft gevolgen voor het klimaat vanwege de reacties die waterstofgas in gang zet in de troposfeer, waardoor broeikasgassen minder snel worden afgebroken.

2.2 Preventieve maatregelen: systeemkeuzes

Het kiezen van bepaalde systeemopties is bepalend voor het al dan niet optreden van milieueffecten en/of de mate waarin milieueffecten optreden. De belangrijkste optredende effecten zijn zo volledig of deels te voorkomen. Daarmee kan de systeemkeuze worden gezien als preventieve maatregel tegen de worst-case situatie. Een overzicht hiervan is gegeven in Tabel 2.1. Indien mogelijk is een worst-case effect aangegeven.

Tabel 2.1 Overzicht van alternatieve systeemkeuzes om effecten zo veel mogelijk te voorkomen, per effecttype

Effecttype	Worst-case	Preventie	Toelichting
wateropname	centraal, compressie op zee (centraal), open koelwatersysteem	luchtkoeling, gesloten koelsysteem, compressie op land	
warmte	centraal, compressie op zee (centraal), open koelwatersysteem	luchtkoeling, compressie op land	centrale opstelling is mogelijk efficiënter dan een decentrale opstelling. Hierdoor is de netto afgifte van warmte mogelijk lager
pekel	-	-	onzekerheid over effecten van pekel betreft vooral de mate van menging
chemicaliën	open koelwatersysteem	luchtkoeling, gesloten koelsysteem, compressie op land	
geluid	compressie op zee	compressie op land	onderscheid tussen effecten van centraal en decentrale compressie is op basis van huidige informatie niet te maken
gaslozing (affakkelen)	semi-centraal	waterstof opslaan i.p.v. affakkelen. Of, niet affakkelen tijdens vogeltrek	waterstofopslag systemen zijn vanwege de extra kosten wellicht niet aanwezig. Er kunnen ook vogels aanwezig zijn buiten de vogeltrek.

2.3 Mitigerende maatregelen

Ten aanzien van de bekende milieueffecten (zie 1.3.1) kunnen, indien nodig, daarvoor bekende mitigerende maatregelen worden getroffen. Dit geldt bijvoorbeeld voor het mitigeren van heigeluid. Bij waterstofspectifieke milieueffecten zijn de grootste effecten te verwachten ten aanzien van waterinname, warmte- en chemicaliënlozing, en eventueel pekellozing. Deze maatregelen zijn aanvullend op de systeemkeuzes, die hiervoor zijn behandeld. Te denken is aan: (niet uitputtend):

- waterinname, te hoge sterfte:
 - beperken inname volume;
 - beperken stroomsnelheid inname;
 - variatie aanbrengen in inname locaties, dieptes, wijze et cetera;
 - beperken visintrek (door aanpassen pompsystemen);
 - inlaat haaks zetten op de dominante stroming;
- koelwater, te hoge temperatuur uitgaand koelwater:
 - aanpassing van het debiet: Hierdoor ontstaat een lager temperatuurverschil tussen het in- en uitgaande stroom. gaslozing (affakkelen). Het beïnvloede gebied wordt echter wel groter en zorgt voor een grotere hoeveelheid waterinname, wat de effecten van inname van soorten kan vergroten;
 - toepassing van luchtkoeling of een hybride vorm van lucht- en waterkoeling;
 - toepassing van elektrolyzers met minder warmteafgifte;
- koelwater, te veel reinigingschemicaliën:
 - toepassing van mechanische reiniging;
 - keuze voor luchtkoeling of waterkoeling met een gesloten systeem;
 - toepassing van natuurvriendelijke anti-fouling (welke niet terechtkomen, door reageren, of accumuleren in het mariene milieu);
- pekellozing, te hoge zoutconcentraties:
 - de zoutconcentratie van het pekewater kan door menging met zeewater verlaagd worden voordat het geloosd wordt;
 - meerdere en andere lozingslocaties om menging te stimuleren.

2.4 Alternatieve koelsystemen

Zoals hierboven is aangegeven, hebben open koelsystemen met gebruikmaking van zeewater veel nadelige milieueffecten. Om deze reden is een inventarisatie van alternatieve koelsystemen uitgevoerd.

Watergekoeld systeem met een gesloten warmtewisselaar onder water

In dit systeem wordt het warme koelwater van de elektrolyser door een gesloten onderwater geplaatste warmtewisselaar geleid. Daarna wordt het afgekoelde water teruggevoerd naar de elektrolyser. Een dergelijk koelsysteem bestaat grofweg uit een grote warmtewisselaar en één of meer pompen. De warmtewisselaar bestaat uit een (parallel) pijpleidingsysteem met voldoende warmtewisselend oppervlak. Pompen zorgen ervoor dat het warme koelwater naar de warmtewisselaar en daarna naar de elektrolyser wordt teruggevoerd. De warmtewisselaar wordt op een nader te bepalen diepte onder het productieplatform geplaatst. Verticale convectie zorgt ervoor dat opgewarmd rivier- of zeewater omhoog stroomt, zodat vers koud water naar de warmtewisselaar wordt aangevoerd.

Ondanks de nadelen worden doorgaans open koelsystemen toegepast voor processen of installaties met grote koelbehoefte, zoals conventionele elektriciteitscentrales (voor afvoer van overtollige proceswarmte) of offshore olie- en gasplatforms (voor koeling van compressoren, turbines en/of gaskoelers). Hierbij wordt relatief koud water uit een rivier, meer of zee opgezogen, het te koelen systeem gekoeld, waarna het opgewarmde water in hetzelfde waterlichaam wordt geloosd. Toepassingen van gesloten koelsystemen komen zelden voor.

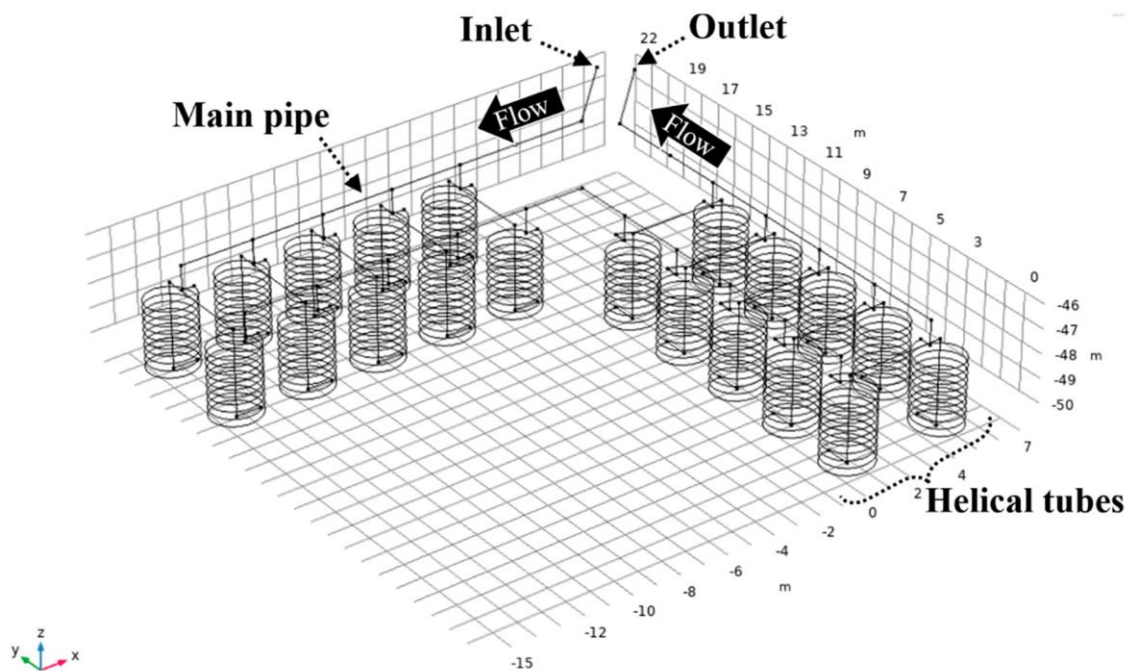
Hieronder worden twee voorbeelden van koelsystemen met een gesloten warmtewisselaar onder water en een innovatief lucht- en waterkoelsysteem behandeld.

Gesloten koelsystemen

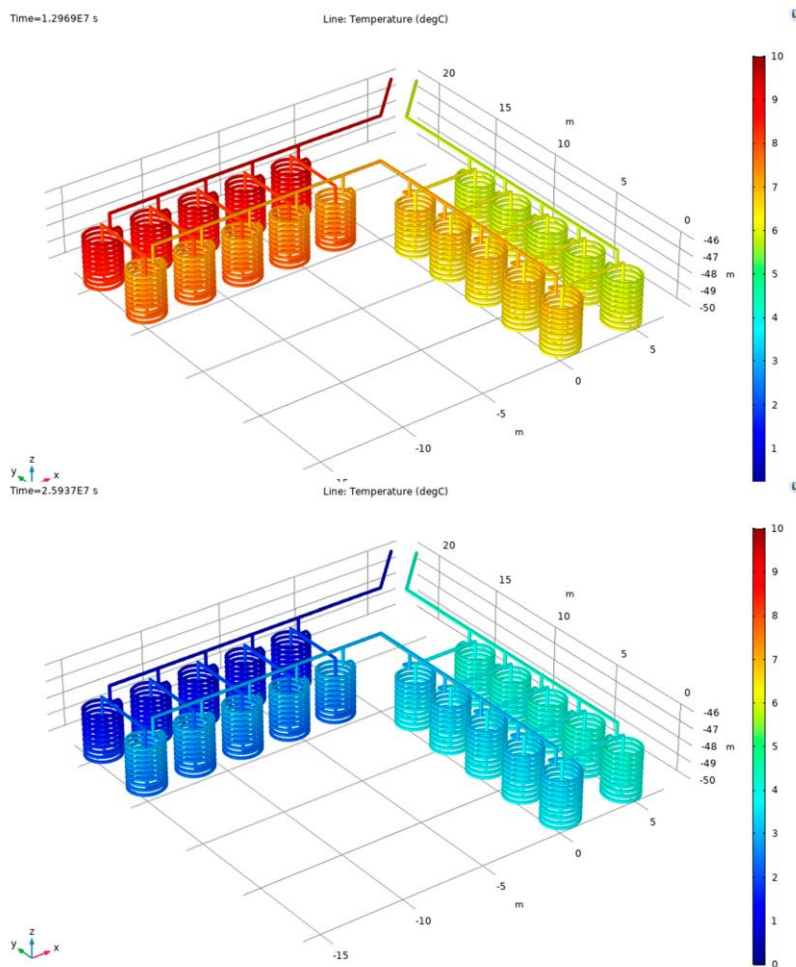
Voorbeeld 1: Warmtepompsysteem met gesloten warmtewisselaar in het meer van Soyang, Korea

In Korea is een [gesloten koel- en verwarmingssysteem met onderwater warmtewisselaar](#) ontwikkeld met vermogen van circa 50 kW. De onderwater geplaatste warmtewisselaar bestaat uit een set van circa 20 spiralen (zie Afbeelding 1.3). Het volume van deze warmtewisselaar is ongeveer 500m^3 . Als je dit systeem zou opschalen naar een koelvermogen van 150MW zou het systeem een volume hebben van circa $1.500.000\text{m}^3$. Indien voor de warmtewisselaar een hoogte van 10 meter wordt aangenomen, dan wordt het oppervlak circa 15 hectare (100 x 1500 meter). Zelfs na optimalisatie van het ontwerp zullen de afmetingen van de warmtewisselaar enorm groot zijn. Dit maakt dat een dergelijk systeem vooralsnog technisch-economisch onhaalbaar is. Een dergelijk systeem is technisch complex, materiaal- en kapitaalintensief en risicovol (kwetsbaar). Een gesloten koelsysteem is op deze schaal nog niet eerder toegepast.

Afbeelding 2.3 De geometrie van de onderwater warmtewisselaar in het Meer van Soyang



Afbeelding 2.4 Temperatuurverdelingen van de koeling (boven: 150 dagen) en verwarming (onder: 300 dagen) van het koel- en verwarmingssysteem gesimuleerd voor de installatiediepte van 50 m. De kleurschaalbalk geeft de temperatuur weer in graden Celsius



Voorbeeld 2: De Subsea Heat Exchanger

Dit betreft een [gesloten koelsysteem](#) dat is ontworpen voor toepassing op offshore olie- en gasplatforms. Het systeem werkt zonder pompen of actieve koeling. In plaats daarvan wordt het direct onder water geplaatst, waar het gebruikmaakt van de natuurlijke convectie van het omringende zeewater om warmte af te voeren. Er wordt geen water aangezogen of geloosd.

Dankzij het passieve ontwerp verbruikt het systeem geen energie voor koeling en vereist het nauwelijks onderhoud. Dit maakt het systeem bijzonder milieuvriendelijk. Deze eigenschappen maken het systeem tot een duurzame en efficiënte oplossing voor thermisch beheer in maritieme omgevingen. De koelcapaciteit van dit systeem wordt in de bron niet vermeld. Dit systeem is robuust ontworpen voor toepassing op zee. Aangenomen moet worden dat de warmtewisselaar voor dit concept en toepassing op 150MW schaal ook een enorm volume (qua orde grootte vergelijkbaar met het systeem van *Voorbeeld 1*) zal hebben. Hierdoor zal ook dit systeem op 150MW-schaal naar verwachting technisch-economisch niet haalbaar zal zijn.

Afbeelding 2.5 Onderwater warmtewisselaar voor een offshore olie- en gasplatform



Luchtkoelsysteem

Voorbeeld 3: Cascade Cooling lucht- en waterkoelsysteem

[Cascade Cooling](#) is een innovatief koelsysteem, dat specifiek is ontworpen voor grootschalige elektrolyzers voor waterstofproductie. Bij een elektrolyserinrichting is op meerdere plaatsen behoefte aan koeling. Koeling is nodig in de converter, waar wisselstroom (AC) wordt omgezet naar gelijkstroom (DC). Daarnaast moeten de gevormde gassen gekoeld worden vóór zuivering en tijdens compressie. Het systeem werkt op basis van een slimme combinatie van droge en natte koeltechnieken, afhankelijk van de weersomstandigheden.

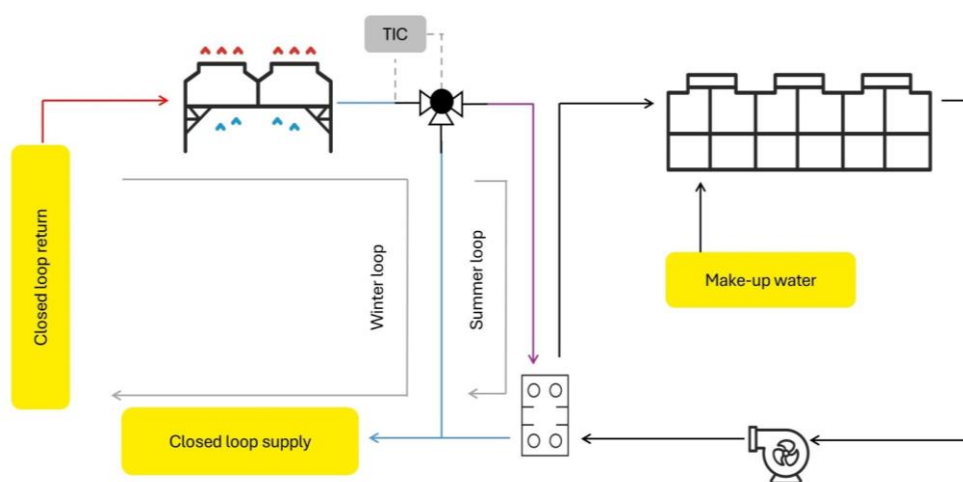
In koudere weersomstandigheden, wanneer de omgevingstemperatuur relatief laag is opereert het systeem in een gesloten lus met luchtkoelers. Tijdens warmere weersomstandigheden draaien de luchtkoelers op volle capaciteit, waarbij extra koeling wordt geleverd door natte koeltorens. Door deze gecombineerde configuratie wordt de grootte van de apparatuur en het aantal ventilatormotoren gereduceerd.

Een praktijkvoorbeeld van het Cascade Cooling systeem vond plaats in een grootschalige groene waterstofproductiefaciliteit met elektrolysecapaciteiten van $2 \times 200 \text{ MW}_e$ en $1 \times 100 \text{ MW}_e$, gelegen in een gebied met waterschaarste. Dit vereiste een oplossing met minimaal waterverbruik en zo veel mogelijk luchtkoeling. Tijdens zomermaanden, waar temperaturen gedurende lange periodes boven de 28°C kunnen stijgen wordt een vernevelingssysteem toegepast dat de omgevingstemperatuur bij de koelinlaten verlaagt, waardoor de koelers effectief blijven. Als alternatief kan een nat oppervlak luchtkoeler of een gesloten-loop koeltoren in serie met de luchtkoeler worden gebruikt tijdens piekcondities via het Cascade Cooling systeem.

Hoewel Cascade Cooling meer ruimte vereist, biedt het aanzienlijke besparingen in water en energie, waardoor operationele kosten worden verlaagd. Het Cascade Cooling-concept is volgens de fabrikant toepasbaar vanaf 100 - 200 MW en schaalbaar naar GW-niveau. Ruimte op een platform is kostbaar vanwege de bouwkosten. Dit beïnvloedt de totale kosten van het koelsysteem.

Nader onderzoek moet de techno-economische haalbaarheid uitwijzen. Ook is praktische toepassing op de Noordzee nodig om de werking van het systeem te toetsen, ervaring op te doen met de bouw en operationele en onderhoudsprocessen en meer inzicht te krijgen in de (milieu)effecten. Het ontwerp van het systeem kan meer geavanceerd beheer en onderhoud vereisen in vergelijking met open koelsystemen op basis van doorstroming van zeewater.

Afbeelding 2.6 Schema voor gesloten koelwatersysteem met zomer- en winterloop



Toelichting van Afbeelding 1.6: In de winter is de buitenlucht koud en vindt koeling plaats via droge koelunits (zonder verdamping van water), zoals luchtgekoelde radiatoren (linksboven). In de zomer worden wanneer nodig 'natte koeltorens' (rechtsboven) door de *temperatuur regelaar* (TIC) bijgeschakeld voor meer koelcapaciteit. Onderaan midden bevindt zich de warmtewisselaar waarmee het warme koelwater dan wordt gekoeld. 'Closed loop supply' is het deel van het systeem waar gekoeld water wordt aangevoerd naar de te koelen installatie. Het water heeft hier een lage temperatuur en is klaar om warmte op te nemen. 'Closed loop return': hier komt het opgewarmde water terug uit de installatie, nadat het warmte heeft opgenomen. Dit water moet opnieuw worden gekoeld.

2.5 Kennisleemten

Waterstofproductie op zee staat nog in de kinderschoenen. De verwachting is dat in de komende jaren veel kennis zal worden ontwikkeld. Ten aanzien van besproken verwachte effecten zijn de volgende kennisleemtes het meest prominent:

- ecologische effecten van waterinname, met name ten aanzien van verlies van biomassa, mogelijke selectiedruk en mortaliteit van macrofauna;
- toxische ecologische effecten van anti-fouling chemicaliën, met name ten aanzien van grootschalig en langdurig gebruik;
- te verwachten geluidsdruk bij compressie en waterinname, met name in cumulatie met geluidsdruk in en rond windparken;
- ecologische effecten van warmte-afgifte op zeer lokale schaal (< 500 meter van de bron) en lange termijn cumulatieve effecten (in combinatie met klimaatverandering);
- ecologische effecten van (ophoping) van pekelwater.

2.6 Conclusies en aanbevelingen

2.6.1 Conclusies

Effecten bouw en verwijderingsfase

De milieueffecten tijdens de bouw en verwijdering van onderdelen van offshore waterstofproductie-installaties zijn grotendeels bekend. De onderdelen zijn vergelijkbaar met windturbines, olie- & gasplatforms of een OSS voor een offshore windpark en derhalve treden ook vergelijkbare milieueffecten op. Voor deze fasen zijn ook de onderzoeksmethoden en de beoordelingskaders bekend. In genoemde fasen wordt weinig tot geen waterstof geproduceerd. Daarom treden nauwelijks tot geen waterstofs specifieke effecten op.

Operationele en onderhoudsfase

Tijdens de operationele en onderhoudsfase wordt waterstof geproduceerd en/of is waterstof aanwezig. Ten aanzien van de hiermee samenhangende specifieke effecten bestaan nog veel relevante kennislacunes. Op dit moment is het daarom nog niet goed mogelijk om de effecten van waterstofproductie te bepalen of te vergelijken in de zoekgebieden van de Partiële Herziening van het Programma Noordzee 2022 - 2027.

Hiervoor zijn onder andere locatie- en opstellingspecifieke studies nodig, die in het kader van de kavelbesluiten moeten worden uitgevoerd. Er zijn nog te veel leemten in kennis wat betreft de invloed van de keuze in de opstelling van de waterstofproductie. Het is lastig te voorspellen of de effecten van vele kleinere platforms groter zijn dan de effecten van 1 centrale oplossing.

Bij een centrale opstelling is er een hogere impact per platform, maar zijn er veel minder platforms nodig, terwijl bij een decentrale opstelling kleinere, meer verspreide milieueffecten zijn. Hiernaast zijn locatie, omvang en de toegepaste systemen nog openstaande keuzes. Hierdoor zijn de daadwerkelijke ingrepen in het zoekgebied niet duidelijk en kan er geen realistische worst-case bepaald worden en ook geen beoordeling worden gedaan.

In deze fase vinden ook niet-waterstofspectifieke activiteiten plaats, zoals het transporteren van mensen en goederen van en naar de productielocaties.

Mitigatie

Optimalisatie van het koelwatervolume, luchtkoeling, een gesloten waterkoelsysteem en compressie op land zijn de belangrijkste alternatieve systeemkeuzes die effecten volledig of deels kunnen voorkomen.

Luchtkoeling of gesloten koelsystemen minimaliseren de effecten van warmte- en chemische lozingen.

Beperking van de effecten van wateropname kan door het accepteren van een hogere temperatuur van het geloosde koelwater, het aanpassen van pompsystemen en het variëren van inname locaties en dieptes.

Voor vergelijkbare milieueffecten kunnen overeenkomstige mitigerende maatregelen worden getroffen. Voor deze maatregelen is verdere technische ontwikkeling nodig. Ook moet per geval de technische en economische haalbaarheid onderzocht worden. Op dit moment wordt bijvoorbeeld een gesloten koelsysteem voor een centrale opstelling van 500MW wegens te grote afmetingen van de warmtewisselaar technisch en economisch niet haalbaar geacht.

2.6.2 Aanbevelingen voor toekomstige projecten

Waterstofproductie op zee is een recente en innovatieve ontwikkeling die zich nog in de beginfase bevindt. Tot nu toe is de ervaring beperkt tot installaties van enkele megawatts. Voor een grootschalige uitrol naar 10 gigawatt zijn er nog aanzienlijke stappen nodig. Demo 1, met een capaciteit van circa 20 - 50 megawatt, en Demo 2, met een capaciteit van circa 500 megawatt, zijn cruciale proefprojecten om de benodigde ervaring op te doen voor verdere opschaling. De toepassing van deze techniek op een schaal van 50 tot 500 megawatt is op zichzelf al innovatief. In de demonstratie projecten moet zoveel mogelijk worden geleerd, van de bouwfase tot en met de operationele fase van elektrolyzers en de bijbehorende voorzieningen. Deze projecten dienen als 'proof of concept' om enerzijds te evalueren wat goed werkt en anderzijds te onderzoeken welke aspecten verbeterd kunnen worden.

De lessen die worden geleerd uit Demo 1 moeten zoveel mogelijk worden toegepast in Demo 2. Deze tweede demo gaat uit van een centrale clusteropstelling. Hierbij is het belangrijk om, waar mogelijk, meer innovatieve concepten te integreren.

Bij elke volgende te bouwen waterstofproductiefaciliteit is er een kans om nieuwe inzichten op te doen, wat kan bijdragen aan technische vooruitgang. Door de opgedane kennis en ervaring te benutten, kunnen de prestaties worden verbeterd en de totale kosten per opgewekte hoeveelheid waterstof mogelijk worden verlaagd. Gebied 6/7 biedt Nederland een unieke kans om een kennisbasis op te bouwen, waardoor het Nederland een leidende internationale positie kan innemen in de waterstofproductie op zee.

Uit deze quickscan en eerdere studies komen voor toekomstige offshore waterstofproductie (demonstratie)projecten de volgende meer specifieke aanbevelingen naar voren:

1 locatie-specifieke en gebiedsbrede studies:

Voor toekomstige offshore waterstofproductieprojecten, waaronder Demo 1 en 2, is het van belang om locatie-specifieke studies uit te voeren. Deze studies zouden zich moeten richten op het bepalen van de verschillen in effecten tussen de locaties. Modelleren kan hierbij helpen om inzicht te krijgen in deze verschillen, waarna monitoring kan worden ingezet om de bevindingen te valideren. Diverse aspecten verdienen hierbij aandacht, zoals de verspreiding van koelwater en het onderwatergeluid. Economies of scale kunnen hierbij ook een rol spelen. Het is cruciaal om waardevolle kennis en ervaring op te doen met verschillen in effecten door verschillende lokale omstandigheden, waaronder effecten op de stratificatie, effecten op lokale biodiversiteit, en de invloed van stroming, waterdiepte, en afstand tot de kust. Monitoring, analyse en evaluatie van deze aspecten zullen bijdragen aan een beter begrip van de lokale omstandigheden en de effecten van waterstofproductie. Met resultaten van lokale effecten van verschillende (opwek)locaties kunnen tevens inzichten worden vergroot ten aanzien van cumulatieve effecten van meerdere waterstofopweklocaties in een groter gebied, zoals gebied 6/7;

2 vergelijking van centrale versus gedecentraliseerde concepten: er is behoefte aan meer kennis en inzicht in de verschillen in effecten tussen (semi) centrale en decentrale opstellingen. Het is aanbevolen voor verschillende aspecten, waaronder ecologie, waterkwaliteit en veiligheid, nader onderzoek te doen en na te gaan hoe effecten van veranderingen met een kleinere intensiteit of risico over een groter gebied (gedecentraliseerd) zich verhouden ten opzichte van veranderingen met grotere intensiteit of risico in een kleiner gebied (centrale opstelling);

3 hydrologische modellering: voor Demo 2 waterstofproductieproject bij windpark Ten Noorden van de Waddeneilanden (circa 500MW) zijn eerste verkennende berekeningen gemaakt met een hydrologisch 3D-computermodel. Verder onderzoek met dit model is nodig om de effecten van (koel)waterinname en -lozing beter te kunnen bepalen. Dit model kan helpen bij het verkrijgen van kwalitatief en kwantitatief inzicht in de effecten van inname van water, inclusief de invloed van inname locaties en diepte). Ook kan beter inzicht verkregen worden in de verspreiding van de in het koelwater aanwezige warmte, chemicaliën en pekels;

4 onderzoek alternatieve koelsystemen: vermindering de effecten van waterinname en lozing van koelwater kan voor een open koelwatersysteem bereikt worden door het optimaliseren van de hoeveelheid koelwater in relatie tot de temperatuur van het geloosde koelwater. Voor verdere vermindering van de effecten is onderzoek naar alternatieve koelsystemen aanbevolen, zoals koelsystemen met volledige of gedeeltelijke (hybride) luchtkoeling. Gesloten koelsystemen met een warmtewisselaar onderwater hebben belangrijke voordelen. Nader onderzoek is echter nodig om de technische en economische haalbaarheid beter te kunnen bepalen. Ook van belang is onderzoek naar alternatieve minder milieubelastende methoden, zoals mechanische reiniging;

5 monitoring en evaluatie ten behoeven van ecologie: meer kennis en inzicht in de effecten van offshore waterstofproductie op ecologie is nodig om deze te kunnen beoordelen. Monitoring en evaluatie van effecten in toekomstige waterstofproductieprojecten is aanbevolen. In deze projecten kunnen de optredende effecten worden waargenomen en gemeten. Deze gegevens kunnen tevens gebruikt worden om modellen te valideren;

6 onderzoek onderwatergeluid: voer verder onderzoek uit naar de impact van onderwatergeluid van waterstofproductie (afkomstig van elektrolyzers, koelwaterpompen, compressoren en/of vaartuigen), en maak geluidsmodellen. Raadpleeg en of verzamel gegevens over gevoeligheid van vissoorten, zeezoogdieren en benthische levensvormen voor geluid om de effecten op het zeeleven te beoordelen. Literatuurstudie en monitoring kunnen hiervoor relevante informatie opleveren;

7 lozings- en veiligheidsnormen en technologieontwikkeling: stimuleer de ontwikkeling van technologieën, normen en geavanceerde QRA's om interne en externe veiligheid te verbeteren. Hieronder vallen onder andere het vaststellen van lozingsnormen, ontwikkelen van onbemande operatiemethoden en het vaststellen van veiligheidsnormen voor offshore waterstofproductie.

8 emissiestudies: voer studies uit naar de emissie van gasen zoals waterstof en hun effecten op de opwarming van de aarde. Deze studies moeten ook de hoeveelheden van vrijgekomen stoffen tijdens de operationele fase in kaart brengen;

- 9 **brede milieueffecten:** houd rekening met bredere milieueffecten in de Noordzee, zoals thermische vervuiling door warm koelwater wanneer opschaling naar de volledige opgave van 10 GW waterstofproductie op de Noordzee wordt gerealiseerd, en cumulatieve ecologische stressoren van offshore windparken.

Deze aanbevelingen zijn bedoeld om de kennisleemtes omtrent de verspreiding van warmte, chemicaliën en pekel in het zeewater, en cumulatieve effecten, te dichten en bij te dragen aan duurzame en veilige offshore waterstofproductie.

REFERENTIES

- 1 Witteveen+Bos, DNV (2024). *Preliminary study on the environmental effect of hydrogen production at sea*, Ministerie van Klimaat en Groene Groei: <https://www.noordzeeloket.nl/publish/pages/235038/preliminary-study-on-the-environmental-effects-of-hydrogen-production-at-sea.pdf>.
- 2 Chowdhury, S. (2022). Effects of seawater intrusion on the formation of disinfection byproducts in drinking water. *Science of The Total Environment*, 827: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154398>.
- 3 Dong Kyu Park and Youngmin Lee, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34142, Korea (2020), *Numerical Simulations on the Application of a Closed-Loop Lake Water Heat Pump System in the Lake Soyang, Korea*, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/762>.
- 4 Bronswerk, De Subsea Heat Exchanger, The advantages of Subsea Heat Exchanging <https://www.bronswerk.com/subsea-heat-exchanger>.
- 5 Olivier Robert, Global Solutions & Engineering – Hydrogen and Quentin Baraër, Kelvion (2024), *Optimising cooling solutions for large-scale green hydrogen plants*, <https://hydrogentechworld.com/optimising-cooling-solutions-for-large-scale-green-hydrogen-plants>.