



Werk door investerings in groene waterstof

Update en uitbreiding



CE Delft

Committed to the Environment

Werk door investeringen in groene waterstof

Update en uitbreiding

Dit rapport is geschreven door: Cor Leguijt, Emiel van den Toorn, Amanda Bachaus en Chris Jongsma

Met medewerking van: Kees Pulles (KIWA)

Delft, CE Delft, april 2021

Publicatienummer: 21.200427.060

Waterstof / Energievoorziening / Innovatie / Economische factoren / Arbeid / Investerings

Opdrachtgever: Shell Nederland B.V.

Kenmerk: 4550197307

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Cor Leguijt](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
	1.1 Onderzoeksvraag	9
	1.2 Tijdshorizon	9
	1.3 Scope	10
	1.4 Gebruikt model	11
	1.5 Methodologie	11
2	Ontwikkeling waterstofeconomie	13
	2.1 Huidige en toekomstige toepassingen waterstof	13
	2.2 Vraag- en aanbodscenario's	13
3	Vraag naar arbeid door groene waterstof	17
	3.1 Inleiding	17
	3.2 Wind op zee voor waterstof	17
	3.3 Elektrolyse-installaties	19
	3.5 Hogetemperatuurwarmte in de industrie	22
	3.6 Waterstof als grondstof in de industrie	23
	3.7 Gebouwde omgeving	25
	3.8 Mobiliteit	26
	3.9 Research & development	28
	3.10 Import van waterstof	30
	3.11 Elektriciteitsproductie (reconversie)	32
	3.12 Fabricage van apparaatonderdelen	32
	3.13 Conclusie vraag naar arbeid	33
4	Regionalisering	36
	4.1 Inleiding	36
	4.2 Verspreiding en clustering	36
	4.3 Conclusie regionalisering	37
5	Additionele arbeid en vervanging	38
	5.1 Inleiding	38
	5.2 Terminologie	38
	5.3 Additionaliteit en vervanging	38
	5.4 Additionaliteit en vervanging in 2030	39
	5.5 Additionaliteit en vervanging in 2050	39
	5.6 Conclusie additionele arbeid en vervanging	41
6	Conclusies	42
	Literatuur	47



A	Vergelijking met vorige rapport uit 2018	50
	A.1 Scenario's	50
	A.2 Resultaten	51
B	Aannames	53



Samenvatting

Hoofdpunten van het rapport:

- Groene waterstof zal een bijdrage leveren aan de werkgelegenheid in Nederland. De arbeidsvraag ligt in 2030 tussen de 6.000 en 17.300 fte en in 2050 tussen de 16.400 en 92.400 fte.
- De vraag naar arbeid stijgt niet evenredig met de vraag naar waterstof, maar met overtreffende trap. Dit komt ten eerste doordat in een scenario met een grotere waterstofvraag, een groter deel van de waterstofketen in Nederland gevestigd zal zijn. Ten tweede komt het doordat er relatief arbeidsintensieve sectoren bij betrokken worden (mobiliteit en gebouwde omgeving).
- De arbeidsvraag bestaat deels uit vervanging van banen, maar ook uit additionele banen door nieuwe economische activiteiten.
- Het is niet evident dat de arbeidsvraag aansluit op een voldoende en juist gekwalificeerd arbeidsaanbod. Reeds nu al slagen veel bedrijven in de onderzochte sectoren er niet in om het juiste, gekwalificeerde personeel te vinden om de energietransitie te realiseren in het beoogde tempo.

Inleiding

In een klimaatneutraal energiesysteem is er een grote rol voor een energiedrager waarbij bij verbranding geen CO₂ vrijkomt, zoals groene waterstof. In 2018 heeft CE Delft een onderzoek uitgevoerd naar werkgelegenheidseffecten door groene waterstof. Dit rapport is daar een uitbreiding en update van.

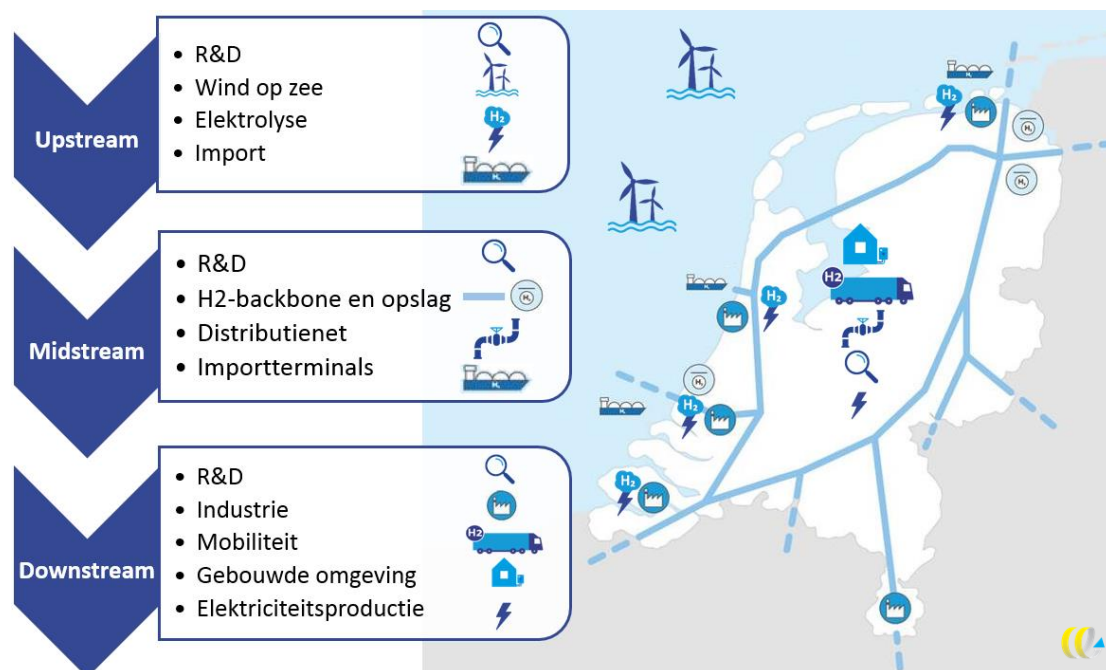
Ook in deze studie is onderzoek gedaan naar de potentiële arbeidsvraag gerelateerd aan groene waterstof in Nederland in 2030 en 2050. Dit is onderzocht per sector, voor een laag en een hoog scenario. Er is gekeken naar de gehele waardeketen van groene waterstof: de eenmalige vraag naar arbeid door bouw en aanleg, en naar terugkerende arbeidsvraag door onderhoud en exploitatie. De arbeidsvraag is uitgedrukt in bruto banen.

Het lage en hoge scenario zijn beide klimaatneutraal maar zijn anders opgebouwd. Het lage scenario heeft zowel minimale toepassing als minimale (Nederlandse) productie van groene waterstof. Het hoge scenario heeft zowel maximale toepassing als maximale eigen productie.

Eenmalige en terugkerende vraag naar arbeid in Nederland

De vraag naar arbeid is berekend aan de hand van de waterstofvraag. Dit is gedaan voor de onderdelen wind op zee (het aandeel t.b.v. waterstofproductie), elektrolyse, infrastructuur, import, R&D, mobiliteit, industrie en gebouwde omgeving. Deze sectoren zijn weergegeven in Figuur 1.

Figuur 1 - Waardeketen van waterstof in Nederland



Bron: EZK, bewerking CE Delft.

Eenmalige vraag naar arbeid is uitgedrukt in gemiddelde full time equivalenten (fte) per jaar. Terugkerende vraag naar arbeid is uitgedrukt in fte per jaar op een bepaald tijdstip. Tabel 1 geeft een overzicht van de onderzoeksresultaten.

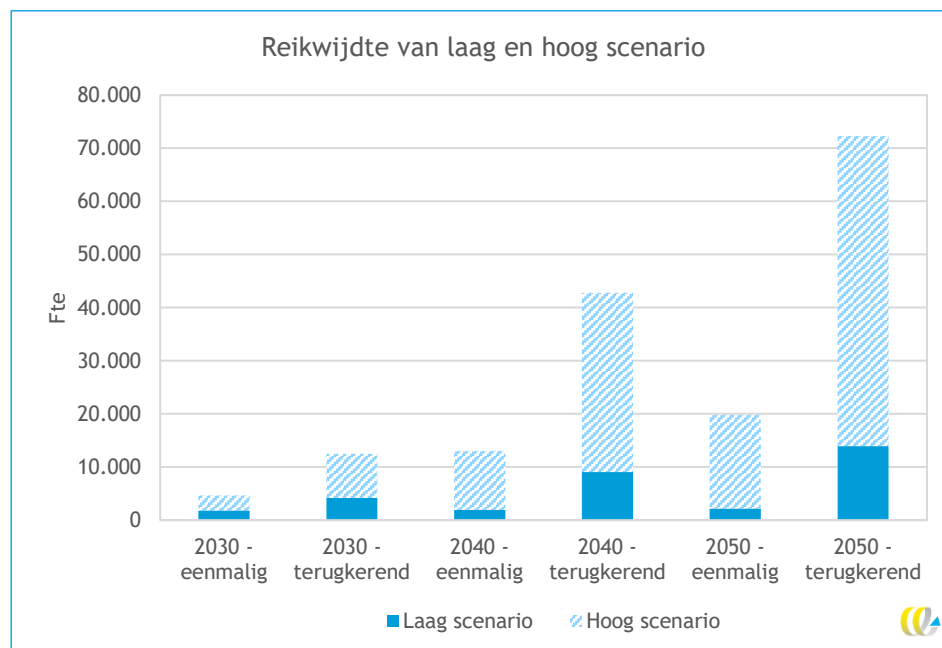
Tabel 1 - Overzicht van vraag naar arbeid (afgerond op honderdtallen)

Jaar	Vraag naar groene waterstof (PJ)	Totale eenmalige vraag naar arbeid (gemiddeld, in fte/jaar)	Terugkerende vraag naar arbeid (in fte/jaar)
2030	10-40	1.800-4.700	4.200-12.500
2040	132-317	2.000-13.000	9.200-43.000
2050	254-593	2.200-20.000	14.200-72.600

In Figuur 2 is het verschil in arbeidsvraag tussen het laag en hoog scenario weergegeven voor eenmalige en terugkerende banen. Er komt duidelijk naar voren dat terwijl de waterstofvraag in het hoge scenario ten opzichte van het lage scenario ruim verdubbelt, de arbeidsvraag in het hoge scenario in 2040 en 2050 met minimaal een factor vier stijgt ten opzichte van het lage scenario.

Kortom, de arbeidsvraag stijgt niet evenredig met de vraag naar waterstof, maar met overtreffende trap. Dit komt niet alleen doordat in het hoge scenario een groter aandeel upstream in Nederland zit, maar ook omdat het verschil tussen beperkte toepassing en overheersende toepassing in de sectoren mobiliteit en gebouwde omgeving meespeelt. In die twee sectoren heeft een relatief beperkte vraag naar waterstof een groot effect op de arbeidsvraag. Het zijn twee relatief 'arbeidsintensieve' sectoren.

Figuur 2 - Verschil tussen laag en hoog scenario in arbeidsvraag



Een belangrijk punt bij de inschatting van de toekomstige arbeidsvraag is het soort arbeid dat nodig is. In vrijwel alle sectoren die genoemd zijn in dit rapport bestaat de arbeidsvraag voor een groot gedeelte uit technisch geschoold personeel (mbo-techniek). De benodigde deskundigheid zal specifiek gericht zijn op de eigenschappen van waterstof (conversie, opslag, veiligheid, etc.).

Dat de arbeidsvraag en het aanbod op elkaar aansluiten in de onderzochte scenario's is niet evident. Reeds nu al slagen veel bedrijven in de verschillende sectoren er niet in om het juiste, gekwalificeerde personeel te vinden om de energietransitie te realiseren in het beoogde tempo. Gezien de afname van instroom bij het technisch beroepsonderwijs, is het waarschijnlijk dat het tekort alleen maar op zal lopen, terwijl de vraag naar personeel zal groeien.

Waar hangen de scenario's van af?

De mogelijkheid dat de werkelijkheid meer richting het hoge scenario beweegt, hangt af van een aantal factoren, waarbij een concrete (beleids-)keuze het verschil kan maken.

Ten eerste is de capaciteit om zelf in Nederland grote hoeveelheden waterstof te produceren maatgevend bij het genereren van de arbeidsvraag door groene waterstof. Die capaciteit hangt direct samen met het opgesteld vermogen wind op zee.

Ten tweede dient de markt voor groene waterstof tot ontwikkeling te komen. Voor dit punt is echter ook de prijs van groene waterstof van belang. Dit viel echter buiten de scope van deze studie.

Ten derde kunnen de afzonderlijke sectoren voor hun ontwikkeling richting het hoge scenario ook afhankelijk zijn van specifieke beleidsmaatregelen. Dit geldt in het bijzonder voor sectoren waar groene waterstof niet de enige klimaatneutrale oplossing vertegenwoordigt, zoals gebouwde omgeving en mobiliteit.

Kortom, de ontwikkeling zal afhangen van stimulerende maatregelen. Het gaat dan niet alleen om investeringen, maar ook om standaardisatie van producten, ketenintegratie en onderzoek en innovatie. Ook duidelijkheid omtrent het regelgevend kader voor waterstof-infrastructuur is van belang voor een goed functionerende markt.

Fte per GW elektrolyservermogen

De cijfers over geïnstalleerd elektrolyservermogen en vraag naar arbeid in Nederland kunnen gecombineerd worden om vast te stellen wat het aantal fte in de keten als geheel is per eenheid elektrolyservermogen. Dit is weergegeven in Tabel 2. Hierbij is de eenmalige en terugkerende vraag naar arbeid bij elkaar opgeteld en is de arbeid die verbonden is met waterstofimport eruit gelaten, aangezien die arbeid niet gekoppeld is aan de in Nederland opgestelde omvang aan elektrolyzers.

Tabel 2 - Fte per geïnstalleerde GW vermogen elektrolyser (eenmalig en terugkerend), afgerond

	2030	2040	2050
Geïnstalleerd vermogen laag (GW)	1	2,4	3,7
Geïnstalleerd vermogen hoog (GW)	4,1	18,8	33,4
Eenmalig fte _{gem} - laag	1.200	1.000	1.200
Eenmalig fte _{gem} - hoog	4.000	12.100	18.900
Terugkerend - laag	4.100	6.400	8.600
Terugkerend - hoog	12.500	40.100	67.000
Fte/GW - laag	5.100	3.100	2.700
Fte/GW - hoog	4.000	2.800	2.600

In 2030 hangt één GW aan elektrolyservermogen samen met een totale werkgelegenheid van circa 4.000-5.000 fte in de keten als geheel. Hoewel de totale werkgelegenheid toeneemt in de tijd, neemt de werkgelegenheid in de keten per GW elektrolyser geleidelijk af. Dit komt vooral doordat er aanvankelijk relatief meer arbeidsvraag zit in R&D en aanleg van structurele aspecten zoals de realisatie van de waterstofbackbone. Beide zorgen er voor dat de gehele keten uiteindelijk tot ontwikkeling kan worden gebracht. Ook mobiliteit genereert al in 2030 een aanzienlijke arbeidsvraag terwijl het geïnstalleerd vermogen aan elektrolyzers dan nog relatief beperkt is.

Methodiek

Om de arbeidsvraag te berekenen is voor de meeste onderdelen gebruikgemaakt van een model waarbij het uitgangspunt de vraag naar groene waterstof was. Hier zijn vervolgens investeringscijfers aan gekoppeld met het aandeel arbeid. Hieruit volgt de eenmalige vraag naar arbeid. De vraag naar terugkerende arbeid is uitgerekend met behulp van de onderhouds- en exploitatiekosten. Zowel de eenmalige als terugkerende arbeidsvraag bestaat uit bruto, voltijdsbanen (zowel additionele- als niet-additionele banen).

1 Inleiding

Waterstof is inmiddels niet meer weg te denken uit de toekomstplannen van zowel overheden als industrie. Het is de bedoeling dat richting 2030 en vooral richting 2050 (groene) waterstof een grote rol gaat spelen in de energie en grondstofhuishouding.

Hoewel over de toepassingen van waterstof en de klimaateffecten al veel bekend was, bleven de mogelijke werkgelegenheidseffecten onderbelicht. In 2018 heeft CE Delft een onderzoek uitgevoerd naar de effecten van groene waterstof op de arbeidsvraag (CE Delft, 2018b).

In dat rapport werd onderzocht welk effect groene waterstof in 2030 en 2050 zou kunnen hebben op de vraag naar arbeid in Nederland. Hierbij werd gekeken naar eenmalige en terugkerende vraag naar arbeid, over bijna de gehele keten.

In het rapport uit 2018 werd geconcludeerd dat de bijdrage van groene waterstof aan de werkgelegenheid in Nederland substantieel kan zijn. Tabel 3 geeft een overzicht van de cijfers die uit het onderzoek naar voren kwamen.

Tabel 3 - Overzicht van de vraag naar arbeid in het rapport uit 2018

Jaar	Totale eenmalige vraag naar arbeid (gemiddeld, in fte/jaar)	Terugkerende vraag naar arbeid (in fte/jaar)
2030	350-1.750	800-16.500
2050	850-4.750 (*)	17.500-75.000

(*) Exclusief werkgelegenheid door investeringen in transportnetten en opslag, omdat daarvoor nog geen bruikbare cijfers beschikbaar zijn voor de periode na 2030.

Sinds 2018 zijn de plannen voor waterstof concreter geworden. Zo is onder andere het Klimaatakkoord ondertekend en zijn de investeringsplannen voor waterstof in een verder stadium. Er is ook meer bekend over mogelijke toekomstscenario's voor de energievoorziening en de rol van waterstof daarbinnen, zoals geschetst in II3050.¹

Deze nieuwe informatie geeft aanleiding om de studie uit 2018 te actualiseren. Shell – één van de belangrijke spelers bij de opbouw van de waterstofeconomie – heeft CE Delft gevraagd deze actualisatie uit te voeren, om zo onderbouwd te kunnen adresseren welke toegevoegde waarde de waterstofeconomie – naast verduurzaming van het energiesysteem – heeft voor de Nederlandse maatschappij.

¹ II3050 staat voor Integrale Infrastructuurverkenning voor de periode 2030-2050, waarin verschillende klimaatneutrale scenario's voor het energiesysteem zijn doorgerekend (Kalavasta; Berenschot, 2020).

1.1 Onderzoeksvraag

Het doel van de vervolgstudie is een actualisatie en uitbreiding van de studie uit 2018. De onderzoeksvraag is hetzelfde: *Wat zijn de werkgelegenheidseffecten van de introductie van groene waterstof in Nederland?*

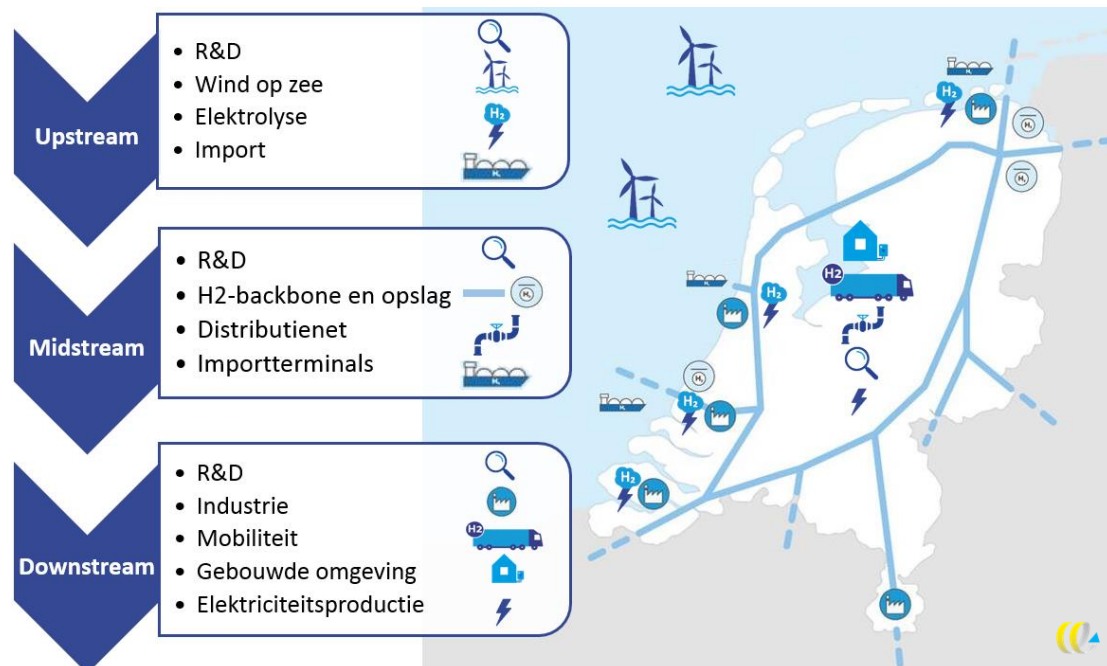
1.2 Tijdshorizon

De tijdshorizon van het project is 2050 met tussenstappen in 2030 en 2040, waarbij de cijfers voor 2040 lineair zijn geïnterpoleerd tussen 2030 en 2050.

Waardeketen waterstof en afbakening onderdelen

De waardeketen van waterstof is in te delen in upstream, midstream en downstream. In Figuur 3 is dit schematisch weergegeven met de geografische implicaties voor Nederland.

Figuur 3 - Waardeketen waterstof in Nederland



Bron: EZK, bewerking CE Delft.

De afbakening van deze studie, afgezet tegen de totale waardeketen van de waterstof-economie, is opgenomen in Tabel 4. De gele velden zijn onderdeel van deze studie.

De meeste onderdelen zijn kwantitatief bepaald met behulp van een model dat uitgaat van de waterstofvraag. Sommige onderdelen zijn kwantitatief, top-down berekend aan de hand van gegevens over de huidige arbeidsvraag. Bij deze top-down-methode is huidige werkgelegenheid in een bepaald segment (CBS-cijfers) gebruikt om toekomstige arbeidsvraag te berekenen. Een aantal onderdelen is kwalitatief beschreven.

Tabel 4 - Overzicht segmenten en deelsegmenten van de waardeketen in de waterstofeconomie.
Geel gemarkeerd betekent: in scope voor deze studie

Keten	Segmenten	Deelsegmenten	Methode
Upstream	R&D	R&D in groene waterstof	Model
	Wind op zee (aandeel t.b.v. waterstof-productie)	Productie windturbines en onderdelen	
		Bouw windparken	Model
		Netverzwaring elektriciteit en aanlanding via waterstofleidingen	Kwalitatief
		Onderhoud aan windparken en netten	Model
	H ₂ -productie (binnenlands)	Elektrolyzers	Model
		SMRs	
		Chlor Alkali	
		(CCS)	
		Pyrolyse	
Midstream	Infrastructuur en distributie	LH ₂ -schepen, liquefactie	
		Gebouwde omgeving	Model
		H ₂ -infra (pijpleidingen, industrie) en opslag (tanks, ondergronds)	kwalitatief
		H ₂ -distributie via tubetrailers	
		Aanpassingen bestaand aardgasnetwerk	Top-down
		Haventerminals	Top-down
		Doorvoer van groene waterstof	Top-down
Downstream	Grondstof (input H ₂ -productie)	Aardgas	
		(Hernieuwbare) elektriciteit (wind op zee)	Model
		Biomassa	
		Restproductie waterstof	
		Geïmporteerde waterstof	Top-down
	Mobiliteit	Auto's en taxi's, vrachtwagens, bestelbusjes, bussen	Model
		Vorklitten, binnenvaart, zeevaart, treinen	
		H ₂ -tankstations	Model
	Industrie (huidig en nieuwe processen/toepassingen)	Chemie: ammoniak, polymer and resin productie	Kwalitatief
		Refining en transportbrandstof incl. synthetische brandstoffen	Kwalitatief
		Staal en ijzer (incl. DRI)	Kwalitatief
		Andere sectoren (e.g. glas, food, semi-conductor)	
		Brandstofcellen (brandstofcellen voor prime power en wkk - PEM)	
		H ₂ -boilers en -fornuizen	Model
		Grootschalige elektriciteitsproductie (H ₂ -verbranding)	

1.3 Scope

Deze vervolgstudie bevat ten opzichte van de eerdere studie een aantal nieuwe elementen, zoals de arbeidsvraag door wind op zee², en een kwantitatieve uitwerking van effecten in de industrie. Een vergelijking tussen de scope van het rapport uit 2018 en het huidige is gegeven in Tabel 5.

² Onshore wind en zon-pv is buiten scope gehouden.

Tabel 5 - Vergelijking scope rapporten 2018 en 2021

Sectoren	Rapport 2018	Huidig rapport
Wind op zee voor H ₂ -productie		✓
Elektrolyzers	✓	✓
HT-warmte industrie	Kwalitatief	✓
Grondstof t.b.v. industrie	Kwalitatief	Kwalitatief
LT-warmte gebouwde omgeving	✓	✓
Mobiliteit	✓	✓
R&D		✓
Infrastructuur	✓	✓
Importterminals		✓
Bemanning importterminals en groothandel		✓

1.4 Gebruikt model

Zoals weergegeven in Tabel 4 is een aantal onderdelen in deze studie met behulp van een model berekend. Ook in de vorige studie is gebruikgemaakt van dat model. Het model berekent de arbeidsvraag aan de hand van de vraag naar waterstof. Alle aannames die hiervoor zijn gebruikt, zijn terug te vinden in de bijlage van dit rapport.

1.5 Methodologie

De in deze studie gebruikte methodologie is dezelfde als in het vorige rapport. Dat wil zeggen dat er gebruik wordt gemaakt van de *employment factor approach*, zie Figuur 4.

Figuur 4 - Verschillende methodieken (en scopes) voor berekenen werkgelegenheidseffecten

	Sectorstudies	Macro-economische impact studies (alle/cross-sectors)	
Direct, Bruto banen	Employment factor approach (kentallen)	Gecorrigeerde (netto) input-output modellering met een correctie voor de zogenaamde consumptie-vector, en vergeleken met referentiescenarios	Direct + indirect, bruto banen
Direct + indirect, Bruto banen	Bruto input-output modellering (multipliers)	Economische modellering met verschillende scenarios	Direct + indirect, bruto + netto banen

Bron: Hinić.

De *employment factor approach* geeft inzicht in de directe en bruto banen, rekening houdend met verwachte arbeidsproductiviteit van diverse schakels in de waardeketen. Met bruto banen worden zowel additionele als niet additionele banen bedoeld. Banen zijn additioneel als deze door mensen worden ingevuld die anders werkeloos zouden zijn.

Banen zijn niet additioneel als deze door mensen worden ingevuld die slechts van baan veranderen. Het voordeel van deze aanpak is dat er relatief snel inzicht kan worden verkregen in werkgelegenheidsaantallen op basis van beschikbare informatie en data, met een acceptabele mate van nauwkeurigheid, zonder complexe en arbeidsintensieve macro-economische modellering toe te passen.

Uitgangspunt van de analyse vormt de ontwikkeling van de investeringen in de groene waterstofketen. Deze investeringen resulteren uiteindelijk in nieuwe economische activiteiten die werkgelegenheid opleveren. Hiervoor maken we gebruik van de totale investeringen op basis van kostprijsbenadering. Daarbij houden we rekening met het gegeven dat belangrijke productieonderdelen kapitaalintensief zijn en per eenheid investering dus relatief weinig nieuwe arbeid met zich meebrengt.

In dit rapport wordt gerekend met voltijdbanen (fte). In verband met het grote aandeel mensen dat deeltijd werkt in Nederland, zal het aantal werkplekken hoger liggen.

Over het algemeen wordt in dit rapport niet de term ‘werkgelegenheid’ gehanteerd, maar ‘vraag naar arbeid.’ Alvorens de toekomstige, potentiële banen verzilverd kunnen worden, dienen vraag en aanbod van arbeid immers op elkaar aan te sluiten. Uiteindelijk bepaalt op langetermijn de omvang van de beroepsbevolking de ‘evenwichtswerkgelegenheid’, gezien in Nederland onder normale economische omstandigheden er geen structurele werkloosheid is en arbeidsmarkten over het algemeen goed werken. Gedurende een periode van vraaguitval kan extra vraag naar economische activiteiten wel leiden tot het creëren van banen.

Zekerheid dat arbeidsvraag en aanbod op elkaar aansluiten is er niet, en in nog mindere mate bij de ketens van de waterstofeconomie. Reeds nu al slagen veel bedrijven in de energietransitie er niet in om voldoende technisch personeel te vinden. Er is nu al te weinig aanwas van geschikte werknemers, dus elke vraag naar arbeid die in dit rapport wordt genoemd heeft grote kans zich te vertalen in een groeiende schaarste. Tegen deze achtergrond dienen de in deze studie gepresenteerde cijfers te worden gehouden.

2 Ontwikkeling waterstofeconomie

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe de achterliggende scenario's die in deze studie zijn gebruikt, zijn opgebouwd. Eerst wordt een beeld gegeven van de huidige plek van waterstof in de economie, daarna worden de scenario's die voor deze studie zijn gebruikt besproken, en tenslotte wordt een vergelijking gegeven met de scenario's uit de vorige studie.

2.1 Huidige en toekomstige toepassingen waterstof

Waterstof wordt heden ten dage in Nederland vooral als grondstof gebruikt in de industrie. Het gaat hier om grijze waterstof met een omvang van ongeveer 170 PJ, voornamelijk geproduceerd uit aardgas (10% van de Nederlandse aardgasconsumptie). Er zijn groot-scheepse plannen om waterstof als energiedrager en grondstof te introduceren in nog veel meer sectoren van de economie.

Om waterstof te produceren is veel energie nodig. Als waterstof gemaakt wordt uit aardgas, heeft dat aanzienlijke CO₂-uitstoot tot gevolg. Dit wordt grijze waterstof genoemd. Als de CO₂ die vrijkomt bij het productieproces wordt opgevangen en opgeslagen, wordt de waterstof blauw genoemd. Indien waterstof wordt geproduceerd uit hernieuwbare elektriciteit is er sprake van groene waterstof. Daarnaast wordt de term gele waterstof gehanteerd voor waterstof die geproduceerd wordt uit zonnestroom in zonnrijke gebieden.

Hoewel er wel veel pilots en demo's worden ontwikkeld, is groene (of blauwe) waterstof nog nergens rendabel. Om de ambities op het gebied van groene waterstof waar te maken moeten er zowel aan de aanbodzijde als de vraagzijde van de markt ingrijpende ontwikkelingen plaatsvinden.

Nederland heeft de ambitie om niet alleen in de toekomst zelf waterstof veelvuldig toe te passen, maar ook om de waterstof voor een groot deel zelf te produceren uit wind op zee (EZK, 2020). Import van waterstof kan in de toekomst echter ook een belangrijke rol gaan spelen en biedt kansen voor Nederland als doorvoerland.

De kostprijs (ten opzichte van alternatieven) is in hoge mate een bepalende factor voor de toepassing van waterstof, zowel voor consumptie als voor doorvoer. Deze financiële aspecten liggen echter buiten de reikwijdte van deze studie. Daarom is gebruikgemaakt van bestaande scenario's die hieronder zullen worden beschreven.

2.2 Vraag- en aanbodscenario's

Met het oog op de ambities, is het de bedoeling dat zowel consumptie als (een deel van) de productie van groene waterstof in Nederland plaatsvindt. Hierdoor bestaat er in de scenario's enige mate van spanning tussen vraag en aanbod van waterstof. Het productievermogen wind op zee zal niet volledig ingezet worden voor de productie van waterstof, en de vraag naar waterstof zal niet volledig ingevuld worden met elektriciteit van wind op zee.

Om de spanning tussen vraag en aanbod op te vangen is in de scenario's een trapsgewijze prioritering aangebracht. Ten eerste heeft waterstof uit wind op zee prioriteit ten aanzien van waterstofimport. Ten tweede heeft de reguliere elektriciteitsvraag voorrang op de elektriciteitsvraag voor waterstofproductie. Ten derde is aangenomen dat de capaciteit van

elektrolyse exact aansluit op het aandeel wind op zee dat beschikbaar is voor waterstofproductie. Dit wil dus zeggen dat er geen capaciteit elektrolyse primair op het elektriciteitsnet met bijbehorende gridmix is aangesloten. Hieronder worden de drie onderdelen (wind op zee, vraag naar waterstof en invulling vraag) nader toegelicht.

Wind op zee

Voor grootschalige productie van groene waterstof in Nederland is veel vermogen wind op zee noodzakelijk. We gaan uit van één scenario voor 2030 (11,5 GW), zoals aangekondigd in de Routekaart 2030 en van twee scenario's voor 2050, die een boven- en ondergrens weergeven, gebaseerd op de Noordzee Energie Outlook (DNV GL, 2020). Dit leidt voor het totale opgestelde vermogen aan wind op zee tot een bandbreedte van 38 tot 72 GW wind op zee in 2050, dat respectievelijk 7,5 en 13,4% van het Nederlandse deel van de Noordzee beslaat.

Het aandeel wind op zee voor elektrolyse is ook gebaseerd op Noordzee Energie Outlook. In het minimale scenario is 6,5% en in het hoge scenario 33,4% van de elektriciteitsproductie van wind op zee beschikbaar voor de productie van waterstof (DNV GL, 2020). Beide scenario's hebben als uitgangspunt dat de vraag naar elektriciteit als eerste wordt ingevuld.

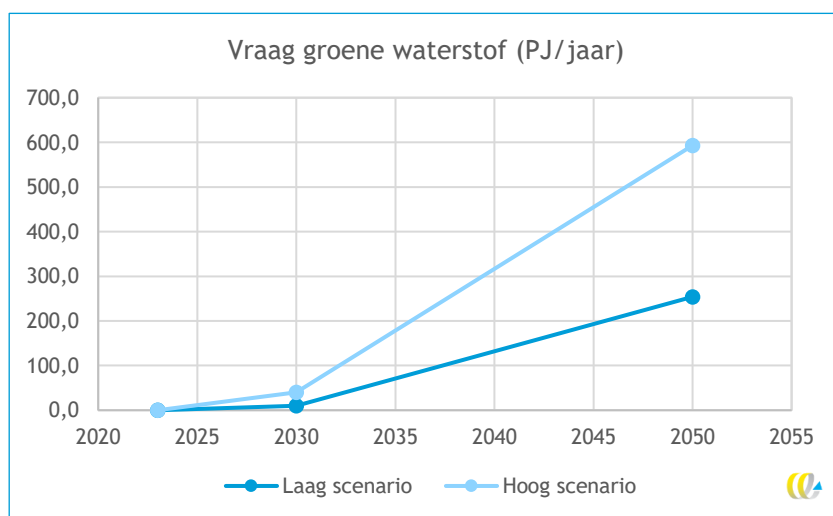
We hebben aangenomen dat het aandeel wind op zee beschikbaar voor elektrolyse vanaf 2023 lineair begint op te lopen richting 2050.

Vraag naar waterstof

De vraag naar groene waterstof zal in 2030 nog relatief laag zijn. Als ondergrens is er 10 PJ genomen en als bovengrens 40 PJ. Het Klimaatakkoord heeft de ambitie gesteld van 3-4 GW vermogen aan elektrolyse in 2030, wat ongeveer overeenkomt met 40 PJ. Beide scenario's starten vanaf 2023.

Voor 2050 is uitgegaan van klimaatneutraliteit en is voor de vraag naar waterstof gekeken naar het minimale en maximale scenario uit de vier scenario's in II3050: respectievelijk regionale sturing en internationale sturing (Berenschot & Kalavasta, 2020). Dit levert een bandbreedte op van 254-593 PJ groene waterstof, zie Figuur 5.

Figuur 5 - Vraag naar groene waterstof, laag en hoog scenario



In Tabel 6 is de vraag weergegeven voor de afzonderlijke sectoren. De twee scenario's vertegenwoordigen de twee uitersten en II3050 heeft nog twee andere scenario's die er tussenin liggen. Het is dus belangrijk om te beseffen dat we hier echt te maken hebben met een minimaal en maximaal scenario (twee 'hoeken van het speelveld').

Tabel 6 - Potentiële waterstofvraag in 2050 volgens regionale en internationale sturing (laag en hoog)

Cijfers in PJ	Regionale sturing	Internationale sturing
Gebouwde omgeving	0	54
Mobiliteit	12	104
Industrie - grondstof	14	134
Industrie - energetisch	95	225
Elektriciteitsproductie	129	70
Overig	4	6
Totale vraag	254	593

Mobiliteit heeft in beide scenario's uitsluitend betrekking op vervoer over de weg. De binnen- en zeescheepvaart vallen buiten de scope van II3050. Dit wil zeggen dat er in de Nederlandse bunkersector (voor scheep- en luchtvaart) wel degelijk een grote vraag naar waterstof kan bestaan in 2050, bovenop de vraag zoals gegeven in bovenstaande scenario's. Indien de potentiële vraag naar duurzame brandstoffen voor scheep- en luchtvaart volledig ten goede komt aan waterstof, kan de vraag naar waterstof met 523-1.055 PJ stijgen, zie Tabel 7.

Tabel 7 - Potentiële vraag duurzame brandstoffen in 2050 voor bunkers en kerosine

PJ	Regionale sturing	Internationale sturing
Bunkers en kerosine	523	1.055

Bron: (Berenschot & Kalavasta, 2020).

Dit punt wordt nader besproken in het hoofdstuk over mobiliteit.

Over de invulling van de vraag

Zoals eerder beschreven, heeft in deze studie wind op zee voorrang op import, in zowel het hoge als het lage scenario. Dit wijkt af van de invulling van de vraag zoals gegeven in II3050. Daar wordt het internationale sturing-scenario voornamelijk ingevuld met import, omdat de aanname daar is dat de kostprijs voor waterstof (uit zonnrijke gebieden op de wereld) dermate laag zal zijn, waardoor wind op zee slechts beperkt concurrerend wordt in 2050.

Hier wordt echter over opgemerkt:

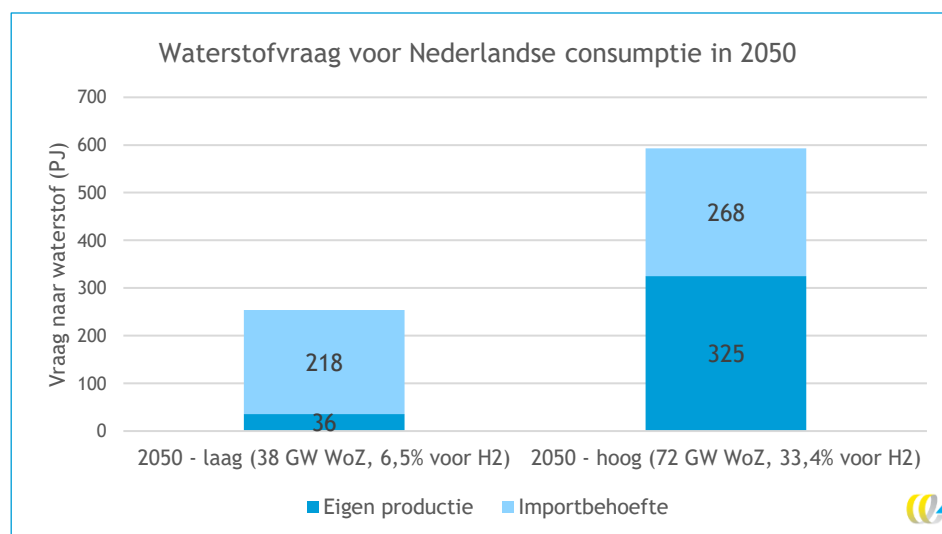
De scenario's geven vier verschillende uiterste toekomstbeelden, maar zijn niet bedoeld om daartussen te kiezen. Ze zijn ook goed combineerbaar en de praktijk zal naar alle waarschijnlijkheid ook ergens tussen deze beelden in kunnen liggen, met accenten naar de vier hoekpunten die overigens ook per sector of energiedrager of omzetting kunnen verschillen. Het is dus goed denkbaar dat oplossingen die in één van de scenario's voorkomen ook in de praktijk voor kunnen komen bij andere scenario's; vele soorten mixen zijn denkbaar. De scenario's zijn alleen met opzet als uiterste projecties gekozen zodat de netbeheerders met alle mogelijkheden rekening kunnen houden (blz. 10, (Berenschot & Kalavasta, 2020)).

Derhalve bestaat er voldoende rechtvaardiging om de invulling van de vraag anders te kiezen dan gegeven in II3050.

Import en eigen productie van waterstof

Als de gekozen scenario's uit de Noordzee Energie Outlook en II3050 worden gecombineerd met de trapsgewijze aannames zoals hierboven genoemd, kunnen er twee volledige vraag-aanbodscenario's worden opgesteld. Deze boven en ondergrens zijn weergegeven in Figuur 6.

Figuur 6 - Import en eigen productie waterstof in 2050 in een laag en hoog scenario



In zowel het lage als het hoge scenario zal er sprake zijn van omvangrijke importvolumes groene waterstof in 2050 (respectievelijk 218 en 268 PJ). Dit kan nog aanzienlijk groter worden als er rekening wordt gehouden met waterstof voor bunkering, synthetische kerosine en doorvoer naar andere Europese landen (zie daarvoor Paragraaf 3.10).

Tabel 8 geeft een overzicht van de cijfers voor het lage en hoge 2050-scenario.

Tabel 8 - Overzichtscijfers waterstof 2050

	Eenheid	2050 - laag	2050 - hoog
Wind op zee (totaal vermogen)	GW	38	72
Voor elektrolyse	PJ	48	433
Waterstofproductie	PJ	36	325
Waterstofvraag NL	PJ	254	593
Importbehoefte NL	PJ	218	268

3 Vraag naar arbeid door groene waterstof

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt per sector onderzocht wat de arbeidsvraag in Nederland is door de introductie van groene waterstof volgens de scenario's uit Hoofdstuk 2. Achtereenvolgens zal er gekeken worden naar de sectoren zoals weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9 - Onderdelen en methode om arbeidsvraag vast te stellen

Sector	Wijze van berekening
Wind op zee voor waterstof	Model
Elektrolyzers	Model
Infrastructuur waterstof	A.d.h.v. model en investeringsplannen/huidige arbeid
Industrie - energetisch	Model
Industrie - grondstof	Kwalitatief
Gebouwde omgeving	Model en huidige arbeid
Mobiliteit	Model
R&D	A.d.h.v. model en huidige arbeid
Waterstofimport	A.d.h.v. aangekondigde volumes en huidige arbeid
Elektriciteitsproductie (reconversie)	Kwalitatief

3.2 Wind op zee voor waterstof

In deze studie is het aandeel van wind op zee dat toegeschreven wordt aan de productie van groene waterstof gebaseerd op de verhoudingen die worden gegeven in de Noordzee Energie Outlook-scenario's voor 2050, wat een bandbreedte oplevert van 6,5 tot 33,4%. Er is van uitgegaan dat dit aandeel vanaf 2023 lineair oploopt richting 2050. In Tabel 10 staat weergegeven hoe de scenario's in deze studie eruitzien.

Tabel 10 - scenario's voor wind op zee en aandeel voor waterstofproductie

	2020	2030 - laag	2030 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Wind op zee (GW geïnstalleerd vermogen)	1	11,5	11,5	38	72
Aandeel voor H ₂ -productie (%)	0	1,9	9,6	6,5	33,4

De vraag naar arbeid door wind op zee is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- levering onderdelen voor funderingen³;
- installatie windmolens;
- onderhoud windparken.

³ Ook de productie van (onderdelen voor) windturbines draagt bij aan de arbeidsvraag in Nederland (bijv. staal voor de masten). Dit is echter niet meegenomen in deze studie omdat het moeilijk toe te rekenen is naar groene waterstof.

Hierbij zorgen de eerste twee onderdelen voor eenmalige vraag naar arbeid, en het derde voor terugkerende vraag naar arbeid. Aangezien in beide scenario's wordt uitgegaan van de bouw van windparken over de gehele periode 2030-2050, is het 'eenmalige' effect in die periode terugkerend. Eenmalige vraag naar arbeid is niet gelijkmatig verdeeld over de hele periode. Tijdens de aanleg van een windpark zullen er piekmomenten zijn en wat rustigere momenten. Daarom wordt eenmalige vraag naar arbeid weergegeven als gemiddeld per jaar.

Om de vraag naar arbeid te berekenen is gebruikgemaakt van gegevens uit het Handelsregister van de Kamer van Koophandel en de literatuur (Knol & Coolen, 2019).

Voor TKI Wind hebben onderzoekers (Knol & Coolen, 2019) in samenwerking met spelers uit de sector een solide, bottom-up-analyse gemaakt van de werkgelegenheid bij het uitrollen van de Routekaart 2023 (zes windparken van totaal 3.663 MW vermogen). In 2020 is hier een vervolgrapport op gekomen (Knol & Coolen, 2020). Uit deze twee rapporten zijn kentallen gedestilleerd zoals weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 - Kentallen bij de aanleg windparken

	Fte/GW (Routekaart 2023)	Fte/GW (routekaart 2030)	Fte/GW (routekaart 2050)
Toelevering funderingen	354	1.311	1.126
Installatie	325	443	391
Onderhoud en exploitatie	88	69	63

Bron: (Knol & Coolen, 2019, Knol & Coolen, 2020).

Met behulp van de kentallen uit Tabel 11 en gegevens over het opgesteld vermogen wind op zee kan de vraag naar arbeid uitgerekend worden. Deze resultaten zijn gecorrigeerd voor het aandeel van wind op zee dat beschikbaar is voor de waterstofproductie. Immers, het grootste gedeelte is bestemd voor directe elektriciteitsbehoefte en draagt derhalve niet bij aan werkgelegenheid door groene waterstof.

In Tabel 12 zijn de resultaten hiervan gepresenteerd.

Tabel 12 - Vraag naar arbeid door aandeel wind op zee bestemd voor waterstofproductie

	2020	2030 - laag	2030 - hoog	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Wind op zee (GW)	1	11,5	11,5	25	42	38	72
Aandeel H ₂ (%)	0	1,9	9,6	4,2	21,5	6,5	33,4
Eenmalige vraag naar arbeid (fte _{gem} /jaar)	0	38	178	95	795	146	1.359
Terugkerende vraag naar arbeid (fte/jaar)	0	15	76	68	592	156	1.516

De levensduur van windturbines is nu ongeveer 25 jaar en dit kan wellicht nog stijgen voor nieuwere types. Het vervangen en eventueel afvoeren en recyclen van windmolens valt buiten de scope van deze studie, maar dit kan richting 2050 wel een rol gaan spelen.

Netverzwaring door wind op zee

In de bovengenoemde arbeidsvraag is reeds rekening gehouden met de aanleg van kabels om windparken aan te sluiten op het landelijk net. Naast deze bekabeling zal het landelijk net, op specifieke plekken, verzwakt moeten worden. Elektrolyse zal grotendeels alleen aan de kust plaatsvinden. Immers, de eerste en grootste elektrolyzers zullen in de industriegebieden langs de kust worden gebouwd. Hierbij is aangenomen dat aanlanding van wind op zee en de locatie van elektriciteitscentrales ook nabij zijn.

Structurele ontwikkelingen op het net (zoals zon-pv, wind op land, piekvraagbelasting), leiden reeds tot noodzakelijke en omvangrijkere netverzwaring. De vraag naar arbeid die ontstaat door netverzwaring is slechts zeer beperkt toe te schrijven aan elektrolyse en is derhalve niet gekwantificeerd in dit onderzoek en niet opgenomen in de verdere analyse.

3.3 Elektrolyse-installaties

Uit elektriciteit van wind op zee kan door middel van elektrolyse waterstof worden geproduceerd. Het Klimaatakkoord heeft 3-4 GW geïnstalleerd vermogen aan elektrolyse tot doel in 2030. Indien daarna het lage scenario zal worden gevolgd, zal dit vermogen ongeveer gelijk blijven tot 2050. De waterstofvraag zal dan voornamelijk met import worden ingevuld.

Als Nederland zelf uit wind op zee waterstof wil produceren dan dient er een aanzienlijke capaciteit aan elektrolyse te worden geïnstalleerd, zie Tabel 13.

In de toekomst kan offshoreproductie van waterstof een rol gaan spelen. Dit is momenteel onderwerp van studie en vanwege gebrek aan gegevens niet in dit rapport opgenomen.

Tabel 13 - Geïnstalleerd vermogen elektrolyzers in Nederland

	2020	2030 - laag	2030 - hoog	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Wind op zee (GW)	1	11,5	11,5	25	42	38	72
Waterstofvraag (PJ)	0	10	40	23	183	48	433
Geïnstalleerd vermogen elektrolyse (GW)	0	1	4	2,4	18,8	3,8	34,7
Eenmalige vraag naar arbeid (fte _{gem} /jaar)	0	229	900	256	1.968	235	2.004
Terugkerende vraag naar arbeid (fte/jaar)	0	172	688	313	2.486	361	3.262

Het hoge en lage scenario vertegenwoordigen een onder- en bovengrens en dus niet een noodzakelijkerwijs realistisch scenario. Daarnaast is de eenmalige arbeid weergegeven als gemiddeld per jaar, terwijl er tijdens de installatie een kortstondige piek van arbeidsvraag kan gelden die vele malen hoger is dan het weergegeven getal. De bouw van een elektrolyser neemt immers slechts een beperkte periode in beslag.

3.4 Gastransportnetwerk

Om waterstof te transporteren moet het hogedruknetwerk voor aardgas aangepast en uitgebreid worden. De investeringen bestaan uit het realiseren van een waterstofbackbone, eventueel het aanpassen van het distributienetwerk, en het gereedmaken van opslaglocaties.

3.4.1 Landelijke waterstofbackbone

De waterstofbackbone is een landelijke ‘ringleiding’ die de belangrijkste industriële centra met elkaar zal verbinden. De backbone heeft niet alleen tot doel het waterstofgebruik in Nederland te faciliteren, maar moet het ook mogelijk maken dat Nederland internationaal een leidende positie kan spelen in de waterstofdistributie. Gasunie heeft plannen klaar om de waterstofbackbone in 2024-2030 te realiseren, waarmee een investering van 1,5 miljard euro is gemoeid (Gasunie, 2021a).

Het investeringsbedrag gedeeld door de gemiddelde omzet per werknemer geeft een grove inschatting van de vraag naar arbeid die ontstaat. Daarbij is een range van 217-331 duizend euro omzet per werknemer per jaar (Tabel 14) aangehouden.

Tabel 14 - Berekende omzet per werknemer in 2018

Economische sector (SBI-code)	Gemiddelde omzet per werknemer per jaar (€/werknemer/jr)
281 Motoren-, pompen- e.d. industrie	330.917
332 Installatie van industriële machines	289.746
422 Buizen- en kabelleggers	287.500
432 Bouwinstallatie	217.568

Bron: (CBS Statline, 2018).

Met een waarde van 1,5 miljard euro, en een aanleg/ombouwperiode van tien jaar, zijn er naar verwachting gemiddeld tussen de 455 en 690 mensen per jaar werkzaam voor het ombouwen van het gastransportnet.

De waterstofbackbone is een essentiële bouwsteen in zowel het lage als het hoge scenario, en er is aangenomen dat de aanleg zowel in het lage als hoge scenario plaatsvindt. Hoewel het mogelijk is dat de backbone in eerste instantie het transport van blauwe waterstof kan faciliteren, is de backbone gericht op een toekomst met groene waterstof. De gegenereerde arbeidsvraag wordt derhalve toegeschreven aan groene waterstof.

Aanleg backbone	2030	2040	2050
Eenmalige fte _{gem} /jaar	573	0	0

Het is mogelijk dat op de industrieterreinen die verbonden worden met de backbone er naast het bestaande aardgasnetwerk een waterstofnetwerk moet worden gebouwd. Vanuit operationeel oogpunt is het buitengewoon complex om alle afnemers binnen een gebied op een moment over te laten gaan van aardgas naar waterstof. Bedrijven zullen bij de transitie verschillende tijdpaden hebben en daardoor zal de aardgasvraag en waterstofvraag gedurende een bepaalde periode tegelijkertijd aanwezig zijn.

Vanwege de onduidelijkheid rondom dit vraagstuk, is de mogelijk verbonden arbeidsvraag hiervoor niet gekwantificeerd in dit rapport.

3.4.2 Waterstofdistributienet

Naast de backbone die vooral voor de industrie en voor doorvoer van belang is, zal het fijnmazige gasdistributienetwerk voor de gebouwde omgeving aangepast moeten worden, mits waterstof in de gebouwde omgeving toegepast zal worden. Hier is alleen sprake van in het hoge scenario.

De aanpassingen zullen relatief gering zijn en zich vooral concentreren op compressorstations en bij de eindgebruiker (aanpassingen gasmeter). Aanpassingen bij de eindgebruikers zelf zijn meegenomen bij de onderdelen industrie en gebouwde omgeving. In 2018 heeft KIWA berekend dat deze operatie maximaal 700 miljoen euro kost (KIWA, 2018). Aangezien waterstof in de gebouwde omgeving pas na 2030 van belang wordt, is aangenomen dat de aanpassingen aan het gasdistributienetwerk daarna zullen plaatsvinden. Voor de periode 2030-2050 levert de aanpassing gemiddeld 161 fte/jaar over een periode van 20 jaar.

	2030-2050 (hoog scenario)
Eenmalige fte _{gem} /jaar	161

3.4.3 Terugkerende vraag naar arbeid met betrekking tot gastransportnetwerk

In 2050 zal Gasunie het grootste deel van haar activiteiten ontplooiën op het vlak van waterstof, die tegen die tijd uitsluitend groen (of geel) zal zijn. Hiervoor zal ook de waterstofbeurs langzamerhand de rol van de gashandelsplaats TTF gaan overnemen. Vertogas, dochterbedrijf van Gasunie, zal Garanties van Oorsprong gaan afgeven voor groene en blauwe waterstof. Dit betekent dat de werkgelegenheid binnen het bedrijf voor zeker driekwart toe te rekenen is aan groene waterstof (naast nog wat groengas, CCU en warmte-infrastructuur). De aard van de werkzaamheden zal goeddeels hetzelfde zijn (infrabeheer, handel, certificaten), maar ingevuld zijn met waterstof in plaats van aardgas (Gasunie, 2021b).

Om het verschil tussen vraag en aanbod op te kunnen vangen, kan waterstof tijdelijk in zoutcavernes opgeslagen worden. Gasunie verwacht, op basis van scenariostudies, 3 tot 9 cavernes in te moeten richten voor waterstofopslag.

Het netwerk voor waterstof moet ook operationeel worden gehouden. Hier zijn ook de regionale netbeheerders bij betrokken. Uiteindelijk zal, als de capaciteit van het gasnetwerk niet toeneemt, dit naar verwachting ongeveer evenveel werknemers vergen als voor het operationeel houden van het aardgasnetwerk. In 2018 waren er in Nederland 14.000 voltijdbanen in de exploitatie van gas- en elektriciteitsnetwerken (CBS, 2020). Dit aantal was stabiel sinds 2008. Als er aangenomen wordt dat het aantal banen stabiel blijft en dat het gelijk is verdeeld over gas en elektriciteit, dan zou dat betekenen dat er in 2050 7.000 terugkerende voltijdbanen bestaan voor onderhoud en exploitatie van het waterstofnetwerk.

De totale bijdrage aan de vraag naar arbeid bij ombouw en aanpassing van het gastransportnetwerk is weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15 - Arbeidsvraag door aanpassing waterstofdistributienetwerk

		2020	2030 - laag	2030 - hoog	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Eenmalige vraag naar arbeid (gem./jaar)	H ₂ Backbone	0	573	573	0	0	0	0
	Distributienetwerk	0	0	0	0	161	0	161
Terugkerende vraag naar arbeid	Onderhoud en exploitatie	0	0	0	0	3.500	0	7.000

3.5 Hogetemperatuurwarmte in de industrie

Vanwege de nog hoge kostprijs van groene waterstof is het niet waarschijnlijk dat groene waterstof een rol gaat spelen in de industriële HT-warmteproductie vóór 2030. Er is aangenomen dat dit na 2030 lineair toeneemt richting 95 PJ in het lage scenario en 225 PJ in het hoge scenario.

Vergelijking fossiele en waterstofprocessen

Voor de productie van warmte in industriële processen worden over het algemeen industriële boilers en fornuizen gebruikt. Deze beschikken over een verbrandingskamer, waar gas al dan niet voorgemengd met lucht, onder hogedruk en onder turbulente stromingscondities in wordt geïnjecteerd.

Gasluchtmengsels met een hoge concentratie waterstof hebben in vergelijking met koolwaterstofgassen (methaan, propaan, butaan) een iets afwijkend karakter. Aandachtspunten hierbij zijn de hogere (laminaire) verbrandingssnelheid (met de risico's van vlaminslag bij voorgemengde branders), de hogere (stoichiometrische) vlamtemperatuur en de verminderde stralingsafgifte van de vlammen (met het risico van hogere NO_x-emissie).

Mits er enige productontwikkeling plaatsvindt, zijn de meeste bestaande branderconcepten relatief eenvoudig aan te passen voor toepassing met waterstof.

Het gebruik van pure waterstof heeft als voordeel dat er geen roetvorming optreedt, waardoor vervuiling van de brander en de verbrandingskamer minimaal is. Bovendien bevat (groene) waterstof geen zwavel, in tegenstelling tot fossiele brandstoffen en de condens is daarom minder corrosief, hetgeen gunstig is voor onderhoud en levensduur. De overige kosten (montagekosten, civiele werkzaamheden en onderhoudskosten, opleidingskosten) zijn gelijk aan die voor conventionele installaties.

Veiligheidsaspecten

De impliciete aanname is dat de veiligheidsvoorschriften voor het gebruik van waterstof niet kostenverhogend zijn. Er zijn geen specifieke wettelijke voorschriften voor het gebruik van waterstof in de industriële omgeving. Maar de kosten van installatie en onderhoud van bijvoorbeeld een waterstofdetectiesysteem zijn bij 50 MW-installaties gering ten opzichte van de totale kosten.

Vraag naar arbeid

De vraag naar arbeid door installatie en onderhoud van industriële boilers en fornuizen is afgeleid van de geschatte investeringskosten (Tabel 34 en Tabel 35 van de bijlage). Er is aangenomen dat er van 2030 tot 2035 zowel om- als nieuwbouw plaatsvindt met een jaarlijks lineaire toename ten gunste van nieuwe installaties. Vanaf 2035 worden er alleen nog nieuwe apparaten geïnstalleerd.

In de berekeningen is uitsluitend gekeken naar fornuizen en boilers van 50 MW. Het gebruik van directe warmte door fornuizen is significant hoger dan bij stoom. Op basis van het TenneT-model heeft CE Delft berekend dat 21,5% van de waterstofvraag naar boilers zal gaan en 78,5% naar fornuizen (CE Delft, 2020). Er is aangenomen dat deze verhouding gelijk blijft in de toekomst. Hiernaast is aangenomen dat er één gasafleverstation per boiler of fornuis nodig is. De in deze studie gebruikte aanschaf- en onderhoudskosten staan in Tabel 34 in de bijlage.

De loonkosten zijn een gemiddelde van de sectoren elektrotechnische industrie, reparatie en installatie van machines en gespecialiseerde bouw.

In Tabel 16 is weergegeven hoe de waterstofvraag zich vertaalt in aantallen boilers en fornuizen en de vraag naar arbeid die hiermee gepaard gaat.

Tabel 16 - Vraag naar arbeid door installatie en onderhoud industriële boilers en fornuizen (50 MW)

	2020	2030 - laag	2030 - hoog	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Waterstofvraag (PJ)	0	0	0	47,5	112,5	95	225
Aantal boilers	0	0	0	6	15	13	30
Aantal fornuizen	0	0	0	23	55	47	110
Eenmalig fte _{gem}	0	0	0	38	289	51	794
Terugkerend fte	0	0	0	71	168	142	336

3.6 Waterstof als grondstof in de industrie

(Grijze) waterstof wordt al decennia toegepast als grondstof in de industrie. Er wordt geschat dat dit huidig gebruik rond de 175 PJ per jaar ligt (Gasunie, 2021b). Nederland is hiermee na Duitsland de grootste verbruiker van waterstof in Europa (Oxford Institute of Energy, 2021).

3.6.1 Huidige situatie waterstof als grondstof

Waterstof wordt nu gebruikt in de volgende industriële sectoren (in volume vooral bij de productie van ammoniak (t.b.v. kunstmest), chemie en raffinage):

- **Chemische industrie:** de productie van ammoniak, polymeer en hars is momenteel de belangrijkste industriële markt voor waterstof; mondiaal wordt 80% van de ammoniak ingezet voor productie van stikstofkunstmest.

- **Raffinage:** raffinaderijen zijn wereldwijd de op een na grootste gebruiker van waterstof in het industrie-segment. Waterstof wordt gebruikt voor hydrocracking⁴ en voor het ontzwellen van brandstoffen.
- **IJzer- en staalindustrie:** waterstof wordt gebruikt voor het uitgloeien van staal (warmtebehandeling van verwerkt metaal om vervormbaarheid na vervorming te herstellen). De vraag naar waterstof in deze industrie ten opzichte van de eerdergenoemde sectoren is nu relatief klein.
- Verschillende **andere industriële processen** gebruiken waterstof. Echter, deze vertegenwoordigen slechts een klein deel van de totale huidige vraag. Deze omvatten: glas, voedsel (voor het harden van vetten), bulkchemicaliën, zogenaamde property chemicals, koeling van elektrische generatoren, de halfgeleiderindustrie en in de ruimtevaart.

3.6.2 Toekomstige situatie waterstof als grondstof

De huidige productieprocessen zijn gebaseerd op fossiele brandstoffen. In Nederland is het produceren van waterstof uit aardgas (Steam Methane Reforming - SMR) de meest dominante route. Aangezien CO₂-afvang (pre-combustion capture; ten behoeve van CCS) eenvoudiger te realiseren is via ATR (Autothermal Reforming) is de verwachting dat die techniek geleidelijk een belangrijker rol zal gaan spelen. Het betreft dan de productie van blauwe waterstof.

De vraag naar *groene* waterstof als grondstof voor 2050 wordt in het lage en hoge scenario geschat op respectievelijk 14 en 134 PJ.

Geproduceerde groene waterstof kan in principe direct door de industriële processen worden afgenomen, ter vervanging van grijze dan wel blauwe waterstof. Bij de productie van kunstmest bestaat er een gelijktijdige behoefte aan CO₂ waardoor groene waterstof aardgas niet één op één kan vervangen. Maar aangezien de twee Nederlandse kunstmestfabrieken (in Zeeland en Limburg) allebei in een industriecluster liggen waar CCS gepland is, is de verwachting dat er daardoor uiteindelijk ruim voldoende CO₂ voorhanden zal zijn.

Vanwege de onzekerheid over de precieze toekomstige vraag naar groene waterstof als grondstof, is er nog geen kwantificering te maken van de vraag naar arbeid. Hieronder wordt een kwalitatieve beschrijving gegeven van de mogelijke toepassingen van groene waterstof:

- **Productie van biobrandstoffen en methanol uit biomassa.** Bij de productie van biobrandstoffen en biomethanol uit biomassa via een zogenaamde Fischer-Tropsch-proces zijn grote hoeveelheden waterstof nodig. De reden is in essentie dezelfde als bij de huidige aardolieraffinage: het opbreken ('kraken') van langere koolwaterstofketens tot kortere koolwaterstofketens vergt extra waterstofatomen.
- **Productie van (bio)synthetische brandstoffen en grondstoffen**, zoals benzine, diesel, kerosine, methanol (de zogenaamde Power-to-Liquids), groengas (methanisering), of nafta, door waterstof en CO₂ te combineren. De CO₂ komt is in dat geval van biogene oorsprong, of komt uit de lucht (DAC: Direct Air Capture), of uit een fossiele bron (carbon capture). Ondanks de beperkte energie-efficiëntie van het totale productieproces, kunnen deze paden hernieuwbare energie en grondstoffen leveren voor sectoren met beperkte emissiereductiealternatieven. Denk bijvoorbeeld aan de chemie, de scheepvaart of luchtvaart en het langeafstandstransport over de weg. Een voorbeeld in

⁴ Hydrocracking is een tweestapswerkwijze die katalytisch kraken en hydrogeneren combineert, waarbij zware grondstoffen bij aanwezigheid van waterstof worden gekraakt om meer gewenste producten te produceren. Het proces maakt gebruik van hogedruk, hoge temperatuur, een katalysator en waterstof.

deze categorie is de Steel-2-Chemicals route⁵, waarbij koolmonoxide (CO) uit de staal-industrie (ArcelorMittal, Tata Steel) met waterstof en een door Dow Terneuzen ontwikkelde katalysator wordt omgezet in een synthetische nafta die als grondstof voor Dow kan worden ingezet.

- **Vermindering van het gebruik van cokeskool bij het chemisch reduceren van ijzererts** (iron ore reduction). Op dit moment maakt staalproductie gebruik van cokeskool als koolstofbron. Cokeskool fungeert als reductiemiddel voor ijzererts (het verdrijven van de zuurstof (O) met koolstof (CO) – dat leidt tot CO₂). Een alternatief en innovatief proces genaamd Directe Reductie via waterstof (DRI-H), waarbij cokesgebruik wordt vermeden bevindt zich momenteel in een pilotfase en wordt gezien als een route voor energie-efficiënte en koolstofarme staalproductie (de zuurstof (O) wordt verdreven) door waterstof (H₂) – wat leidt tot water als restproduct (H₂O); ook Tata Steel in IJmuiden ziet dit als route voor de toekomst, en wil in 2050 klimaatneutraal staal gaan maken geproduceerd met waterstof. In het Zweedse Luleå wordt gebouwd aan een proeffabriek voor staal op basis van waterstof. Die proeffabriek zou kunnen draaien vanaf 2025, maar op een fabriek op echt industriële schaal blijft het vermoedelijk wachten tot 2035.
- **Nieuwe chemie.** Bij bijvoorbeeld chemische recycling van reststromen kan methanol worden geproduceerd, dat weer een belangrijke grondstof is voor de chemische industrie. Bij die processen is waterstof nodig.

3.7 Gebouwde omgeving

In de gebouwde omgeving kan waterstof een rol spelen als energiedrager voor een waterstof-cv-ketel, voor een hybridewarmtepomp en via het warmtenet. In het minimale scenario in deze studie speelt waterstof geen enkele rol in de gebouwde omgeving en wordt klimaatneutraliteit op een andere manier bereikt (o.a. geothermie, groengas, en verbeterde isolatie).

In het maximale scenario wordt 60% van de huishoudens en gebouwen verwarmd met een hybridewarmtepomp op waterstof (nog 15% door middel van een warmtenet en verder volledig elektrische toepassingen).

Hybridewarmtepompen bestaan uit een elektrische warmtepomp en een waterstof-cv-ketel. Ze werken het grootste deel van het jaar elektrisch, maar zullen ongeveer eenderde van de tijd, tijdens de piekvraag, op waterstof draaien.

De minimale en maximale scenario's voor waterstof in de gebouwde omgeving geven de volgende cijfers:

	2020	2030	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
H ₂ huishoudens (PJ)	0	0	0	20,5	0	41
H ₂ gebouwen (PJ)	0	0	0	6,5	0	13
Aantal H ₂ WP (miljoen)	0	0	0	3,5	0	6,95

⁵ Een pilotinstallatie bij Dow Terneuzen is eind 2018 opgestart en na ongeveer een jaar verplaatst naar Tata Steel in IJmuiden.

Productie ketels en installatie hybridewarmtepompen

De productie van cv-ketels voor de Nederlandse markt vindt goeddeels in Nederland plaats. Het productieproces van een ketel op aardgas zal zonder grote aanpassingen kunnen omschakelen naar een ketel op waterstof. Technische aanpassingen zullen namelijk beperkt zijn (Reijerkerk & van Rhee, 2019). Er is in Nederland een tiental bedrijven dat actief is in deze branche met gezamenlijk ongeveer 1.600 werknemers (Kamer van Koophandel, 2021). Grootchalige introductie van waterstof in de gebouwde omgeving zal kortom leiden tot behoud van werkgelegenheid in deze branche.

De installatie van een hybridewarmtepomp is een vrij arbeidsintensieve operatie en levert daarom een relatief grote vraag naar (additionele) arbeid op. De terugkerende vraag naar arbeid betreft onderhoud en productie van cv-ketels en vervangt banen die momenteel met de installatie en productie van hr-ketels samenhangen.

In Tabel 17 zijn de effecten op de arbeidsvraag weergegeven, zoals berekend met het model. In het hoge scenario zal de gebouwde omgeving kortom een sterke arbeidsvraag genereren.

Tabel 17 - Eenmalige en terugkerende vraag naar arbeid in de gebouwde omgeving

	2030	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Eenmalige vraag naar arbeid (fte _{gem} /jaar)	0	0	3.767	0	7.534
Terugkerende vraag naar arbeid (onderhoud, fte/jaar)	0	0	2.841	0	5.681
Terugkerende vraag naar arbeid (productie, fte/jaar)	0	0	800	0	1.600

3.8 Mobiliteit

Mobiliteit wordt gezien als een van de eerste sectoren waar groene waterstof effectief toegepast kan worden, reeds in 2030. Vooral zwaar vervoer zal overstappen naar waterstof, omdat volledig elektrisch de eerste keus is bij personenvervoer. Maar in het hoge 2050-scenario van II3050 rijdt ook 40% van het personenvervoer op waterstof, dat door innovatie en prijsdaling in bepaalde situaties competitief wordt.

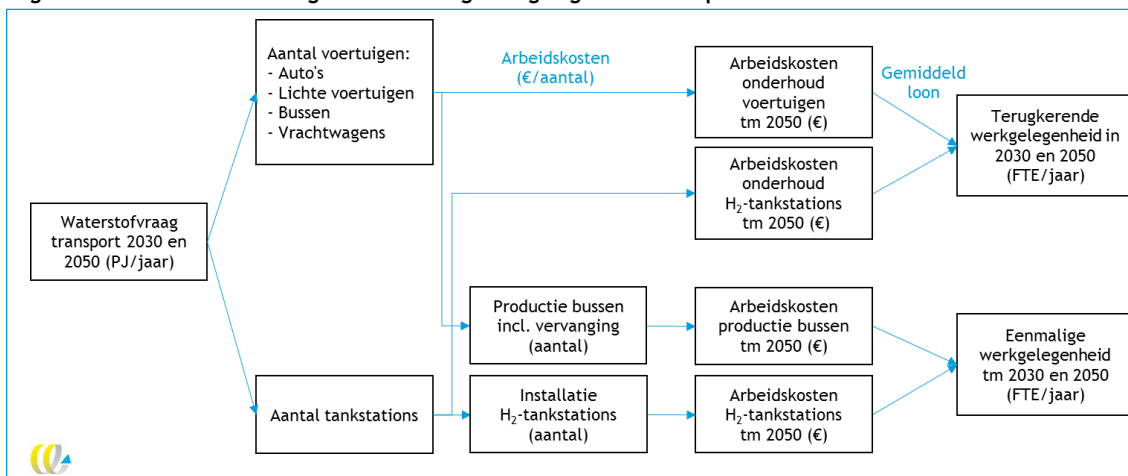
In Tabel 18 zijn de vraagscenario's voor deze studie gegeven. In dit rapport is alleen wegvervoer opgenomen. Binnenvaart, zeescheepvaart en luchtvaart vallen buiten scope.

Tabel 18 - Scenario voor vraag waterstof in mobiliteit over de weg

	2020	2030 - laag	2030 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
H ₂ mobiliteit (PJ)	0	2,7	20	12	104

Toepassing van waterstof in mobiliteit genereert een vraag naar arbeid die voornamelijk huidige banen vervangt (bijv. onderhoud waterstofvoertuigen). Van de productie van voertuigen is aangenomen dat alleen die van bussen in Nederland plaatsvindt. Zoals beschreven in de methodologie berekent het model de vraag naar arbeid op basis van de waterstof-vraag. In Figuur 7 is dit schematisch weergegeven.

Figuur 7 - Schematische weergave berekening werkgelegenheid transportsector



Om de waterstofvraag om te rekenen naar het aantal voertuigen zijn aannames gedaan over het aantal kilometers dat een voertuig maakt gedurende zijn levensduur en de tank-to-wheel-efficiënties. Om het aantal tankstations te bepalen zijn aannames gedaan voor de ratio voertuigen/tankstations.

Vervolgens is de jaarlijkse productie van bussen en installatie van tankstations bepaald. Daarbij is aangenomen dat de levensduur van bussen twaalf jaar is. De jaarlijkse productie van bussen is dus de som van het aantal nieuwe waterstofbussen plus het aantal waterstofbussen dat aan vervanging toe is (herinvestering).

Tot slot zijn arbeidskosten voor onderhoud, installatie en productie bepaald, die voor een groot deel gebaseerd zijn op interviews die in het kader van het vorig onderzoek waren gehouden. Om het aantal fte te bepalen zijn cijfers van het CBS gebruikt voor de arbeidskosten per voltijdeenheid voor verschillende sectoren. De volledige aannames staan in de bijlage.

Vraag naar arbeid

De eenmalige arbeidsvraag ligt naar verwachting tussen de 315 en 2.360 banen in 2030 en loopt op tot 815-7.026 banen in 2050, zie Tabel 19. De eenmalige arbeidsvraag bestaat uit de productie van bussen en de bouw van waterstofvulstations. De terugkerende arbeidsvraag loopt op van 1.134-8.413 in 2030 naar 5.164-44.770 in 2050. De terugkerende werkgelegenheid bestaat uit bemanning en onderhoud van tankstations en het onderhoud van voertuigen.

Tabel 19 - Arbeidsvraag mobiliteit

Arbeidsvraag	2030	2040	2050
Eenmalige vraag naar arbeid (fte _{gem} /jaar) - laag	315	619	815
Eenmalige vraag naar arbeid (fte _{gem} /jaar) - hoog	2.360	5.116	7.026
Terugkerende vraag naar arbeid in (fte/jaar) - laag	1.134	3.157	5.164
Terugkerende vraag naar arbeid in (fte/jaar) - hoog	8.413	26.646	44.770

De arbeidsvraag in mobiliteit is relatief hoog in vergelijking met andere sectoren. Opgemerkt moet worden dat een inschatting is gemaakt van de bruto werkgelegenheid. Naar verwachting is een klein aandeel hiervan additionele werkgelegenheid. Op termijn is de verwachting dat het onderhoud van brandstofcelvoertuigen vergelijkbaar is met het onderhoud van bestaande voertuigen met een verbrandingsmotor. Het gaat hierbij dus voornamelijk om het behoud van bestaande werkgelegenheid. Daarbij zal wel bijscholing of omscholing nodig zijn.

Waterstof in de scheepvaart

Zoals beschreven in Hoofdstuk 2, kan de scheepvaart in de toekomst potentieel voor een grote vraag naar waterstof zorgen. Maar momenteel bestaat hieromtrent nog grote onzekerheid. Er is nog nauwelijks bunkerinfrastructuur voor waterstof en opslagkosten zijn nog erg hoog. Daarnaast is de techniek voor energieomzetting aan boord nog niet volwassen voor grootschalige toepassing. De significante technische verschillen tussen het omzetten van energie uit conventionele bronnen en waterstof, maakt dat waterstof in de praktijk eigenlijk alleen een optie is voor nieuw te bouwen schepen. Transformatie van waterstof in ammoniak zou een kostenefficiëntere optie kunnen zijn, maar is nog in de ontwikkelingsfase. In initiatieven zoals het RH2INE-project - dat zich richt op waterstof voor de binnenvaart op de Rijnkorridor - wordt dit nader onderzocht.

Om het duurzaamheidsdoel van de International Maritime Organization (IMO) te halen (50% minder broeikasgasuitstoot in 2050) dient er wereldwijd 1 tot 1,4 biljoen dollar te worden geïnvesteerd in de periode 2030-2050 (Global Maritime Forum, 2020). Groene waterstof (omgezet in ammoniak) is hierin de belangrijkste duurzame optie. Van de 1 biljoen is geschat dat 44% gericht moeten zijn op de productie van groene waterstof.

Rotterdam is na Singapore de tweede bunkerhaven van de wereld met een marktaandeel van ongeveer 15% (Aymelek, 2014, Maritime Fairtrade, 2019). Als ook de scheepvaart langzamerhand over gaat stappen op waterstof, dan zal Rotterdam - wil het een leidende positie behouden - hierop in moeten spelen.

Vanwege de onzekerheden en nog weinig concrete initiatieven is de potentiële bijdrage van groene waterstof aan de vraag naar arbeid in de scheepvaartsector niet kwantitatief meegenomen in deze studie.

3.9 Research & development

De overschakeling van een fossiele economie naar een waterstofeconomie gaat gepaard met noodzakelijke innovaties en onderzoek. Derhalve genereert de omschakeling ook werkgelegenheid op het gebied van R&D, ook nu al. De kosten gaan immers voor de baten uit.

Zeker vlak voor projecten of bij de ontwikkeling van nieuwe toepassingen zal er fors worden ingezet op innovaties. Maar aangezien de overschakeling een ontwikkeling is verspreid over verschillende sectoren en de hele waterstofketen, wordt in deze studie aangenomen dat er in R&D tot na 2050 werk zal zijn. De R&D-inspanningen zullen in eerste instantie blijven groeien. Naarmate technieken en markten volwassen worden, zal dit weer afnemen.

Huidige R&D in groene waterstof

Om een inschatting te maken van de hoeveelheid fte door groene waterstof in R&D, is eerst gekeken naar de huidige omvang van deze werkgelegenheid. Op basis van het aantal academische artikelen, communicatie met de NERA (Netherlands Energy Research Alliance) en communicatie met private partijen zijn wij tot de inschatting gekomen dat er ongeveer 800 fte werkzaam is in R&D naar groene waterstof bij hoger onderwijs en instellingen.

Hieronder wordt voornamelijk verstaan onderzoek en innovatie naar elektrolyse, de inpassing van elektrolyse in de toekomstige energiemarkt, marktmodellen en scenario-ontwikkeling.

Het CBS geeft verhoudingen van hoe fte in R&D verspreid is over hoger onderwijs, instellingen en bedrijven. Deze verhoudingen zijn de afgelopen jaren stabiel gebleven. In Nederland zit 71% van de fte in R&D bij bedrijven, 6% bij instellingen en 23% bij hoger onderwijs (CBS, 2019).

Op basis hiervan en de informatie over hoger onderwijs en instellingen schatten wij dat er momenteel 1.959 fte bij bedrijven bestaat. Dit geeft een totaal van 2.759 fte aan R&D in groene waterstof in 2020. Dit is 1,8% van alle fte in R&D in Nederland (150.400).

R&D in 2030, 2040 en 2050

R&D staat enigszins los van de fysieke ontwikkelingen in waterstof en gaat er deels ook aan vooraf. Daarom is er in deze studie voor gekozen om de werkgelegenheid in R&D lineair te schalen met het gemiddelde van de investeringen in elektrolyzers over de zeven volgende jaren. Hierbij is de gedachte dat R&D essentieel is de voor uitrol en dus voorafgaat aan de investeringen in elektrolyzers.

Hiernaast is er aangenomen dat tot 2035, er 4,7% van de CAPEX van elektrolyzers gaat naar uitgaven aan R&D in Nederland. Dit is een gemiddelde op basis van cijfers van ECN over werkgelegenheid in de energiesector. ECN schat dat 5-10% van de bestedingen wordt aangewend voor R&D. Hiervan wordt weer 50-75% besteed binnen Nederland (ECN, 2016).

Het is te verwachten dat met het volwassen worden van technologie er minder geld naar R&D zal gaan. Daarom is aangenomen dat vanaf 2035 het percentage van de bestedingen dat naar R&D gaat lineair terug zal lopen van 4,7% nu naar 1% in 2050. Een procent is in lijn met bedrijven in sectoren met lage R&D-uitgaven, zoals mijnbouw en geraffineerde aardolie (OECD, 2016). In combinatie met het groeiend vermogen aan elektrolyzers leidt dit tot een piek in vraag naar arbeid iets na 2030, en daarna een lichte afname.

CBS-cijfers laten een stabiele verhouding zien tussen R&D bij bedrijven, instellingen en hoger onderwijs. Derhalve hebben wij ook aangenomen dat dit verhoudingsgewijs gelijk blijft in de toekomst. Voor loonkosten is gerekend met 84.456 euro/fte.

In Tabel 20 staat de verwachte ontwikkeling van R&D in groene waterstof weergegeven.

Tabel 20 - R&D in Nederland gerelateerd aan groene waterstof

	2020	2030 - laag	2030 - hoog	2040 - laag	2040 - hoog	2050 - laag	2050 - hoog
Geïnstalleerd vermogen elektrolyzers (GW)	0	0,2	4	2,6	24,9	3,8	34,7
Gemiddelde investeringen (van 7 volgende jaren, in mln. euro)	25	50	455	24	229	7	27
Fte in R&D	2.759	2.815	3.321	2.786	3.052	2.767	2.803

3.10 Import van waterstof

Zoals beschreven in Hoofdstuk 2 (Vraag- en aanbodscenario's), speelt import van waterstof zowel in het hoge als het lage scenario een grote rol.

Er is uitgegaan van 38-72 GW wind op zee in 2050, waarvan weer 6,5% tot 33,4% beschikbaar is voor elektrolyse. Hierdoor is Nederland in staat om in 36 tot 325 PJ van de waterstofvraag zelf te voorzien. Dit betekent dat er voor de Nederlandse vraag in het lage scenario nog 218 PJ en het in hoge scenario nog 268 PJ geïmporteerd moet worden.

Doorvoer

Naast import voor eigen gebruik, kan Nederland een sleutelpositie gaan innemen voor import en doorvoer van waterstof naar andere delen van Europa, zoals dat nu voor fossiele brandstoffen geldt. Zo zet het Havenbedrijf Rotterdam in op het behouden van de positie die het nu vervult bij de doorvoer van brandstoffen (Havenbedrijf Rotterdam, 2020).

Het Havenbedrijf Rotterdam verwacht dat er in 2050 20 Mton waterstof (2.400 PJ) door de haven zal gaan, waarvan 8 voor Duitsland en 5 voor overig Noordwest Europa. Dit betekent dat Rotterdam in een derde van de totale Duitse waterstofvraag (24 Mton) zal voorzien. Van de 7 Mton (840 PJ) voor Nederland is 4,2 voor de lucht- en zeescheepvaart, die in de scenario's van deze werkgelegenheidsstudie niet zijn opgenomen. Derhalve is 86% van de waterstof die de Haven van Rotterdam in 2050 verwacht te importeren niet bestemd voor binnenlandse consumptie.

Andere havens

Naast de haven van Rotterdam, zien ook Amsterdam, Zeeland (North Sea Port) en de Eemshaven (Groningen Seaports, 2019) kansen voor de import van groene waterstof. De haven van Amsterdam heeft de ambitie om vanaf 2030 een jaarlijkse hoeveelheid van 1 Mton te importeren en door te voeren. Voor de overige twee havens zijn nog geen concrete plannen bekendgemaakt. Deze importen (per tanker) zijn nog exclusief de aanlanding van waterstof die offshore op de Noordzee kan worden geproduceerd, waarvoor bijvoorbeeld ook in het havengebied van Den Helder plannen worden ontwikkeld.

Er is zowel in het hoge als het lage scenario sprake van grootschalige import en dus de bouw van terminals. De vraag naar arbeid die daaruit voortvloeit wordt in deze studie berekend aan de hand van het toekomstbeeld dat het Havenbedrijf Rotterdam schetst.

Benodigde infrastructuur

Voor het op grote schaal importeren van waterstof per tanker dient er infrastructuur aangelegd of aangepast te worden. Voor de haven zal dit voornamelijk gaan om de aanleg van terminals, die verbonden worden met de waterstofbackbone.

Waterstofterminals zijn er nog niet. Om toch een schatting te kunnen maken van de vraag naar arbeid, is er gekeken naar de aanleg van een LNG-terminal. De aanleg van de Gate-LNG-terminal in het Rotterdamse havengebied, met een capaciteit van 9 bcm (ong. 285 PJ) vergde een investering van 800 miljoen euro (Gate terminal, 2007). Vanwege de grotere complexiteit van een H₂-terminal is de schatting dat deze voor 3 Mt (324 PJ) circa 1 miljard euro zal kosten. Realisatie van de eerste terminal is door het Havenbedrijf Rotterdam gepland voor het jaar 2030, startend in (ongeveer) 2025. In 2050 is een totale importcapaciteit voorzien van 20 Mton, oftewel in de periode 2030-2050 is 17 Mton extra capaciteit nodig. Dit betekent een lichte versnelling ten opzichte van de periode tot aan 2030. Daarbij zal er ook sprake zijn van leer- en schaafeffecten. De ruwe schatting is dat dit ongeveer 5 miljard euro zal kosten.

Vergelijking met Europees scenario

13 Mton van de genoemde 20 Mton (2.400 PJ) is dus bestemd voor doorvoer naar andere landen, waaronder Duitsland.

In het ambitieuze Europese scenario van FCH, zal er in 2050 een waterstofvraag van 8.107 PJ bestaan. Het lage (business as usual)-scenario gaat uit van 2.808 PJ in 2050. Alleen in het ambitieuze scenario speelt de vraag vanuit scheep- en luchtvaart een rol van betekenis (FCH JU, 2019).

Wanneer alleen gekeken wordt naar de 20 Mton, zou dat betekenen dat Nederland een grote rol zal spelen in de Europese waterstofmarkt (ongeveer 30% van de Europese waterstofvraag zou door Nederland gaan in het hoge scenario).

Eenmalige vraag naar arbeid

Op basis van gemiddelde omzetcijfers van bouwinstallatie en buizen- en kabelleggers, levert de aanleg van haventerminals gemiddeld 660 fte per jaar op in de periode 2025-2030 en gemiddeld 943 fte per jaar in de periode 2030-2050:

Aanleg haventerminals	2025-2030	2040	2050
Eenmalige fte _{gem} /jaar	660	943	943

Terugkerende vraag naar arbeid

De import van waterstof brengt ook vraag naar arbeid met zich mee voor de bediening en onderhoud van terminals, en in de commerciële functies die samenhangen met de handel en doorvoer. Er bestaat in Nederland op dit moment een omvangrijke werkgelegenheid in de groothandel van fossiele brandstoffen, van in totaal 5.300 fte (CBS Statline, 2018). Ook in de Havenvisie van Rotterdam wordt er uitgegaan van het behoud van de marktpositie die Rotterdam momenteel bekleedt bij de doorvoer van energiedragers.

Hoe de arbeidsvraag in die sector zich zal ontwikkelen richting de toekomstige waterstof-economie hangt af van de positie die Nederland in die toekomst zal weten in te nemen.

De haventerminals die gebouwd worden ten behoeve van de import zullen ook bemand worden. Omdat deze terminals nog niet bestaan, zijn er geen exacte cijfers bekend met betrekking tot het aantal banen dat hiermee gepaard gaat. Nochtans, kan gebaseerd op banen benodigd voor een LNG-terminal een schatting gemaakt worden. Zo zijn er bijvoorbeeld voor de Lake Charles LNG-terminal ongeveer 50 werknemers betrokken voor het dagelijks bedrijf (Shell, 2020).

Geschaald aan de hoeveelheid terminals leidt dit tot minimaal 50 terugkerende banen in 2030 en ongeveer 300 in 2050, zie Tabel 21.

Tabel 21 - Arbeidsvraag door import van groene waterstof

Terugkerende fte/jaar	2025-2030	2040	2050
Aantal importterminals	1	4	6
Bemanning haventerminals	50	175	300
Groothandel	0	2.650	5.300

3.11 Elektriciteitsproductie (reconversie)

Ondanks het groeiend aanbod elektriciteit op basis van wind en zon, is er in alle scenario's sprake van momenten dat de wind niet waait en de zon niet schijnt. De term 'Dunkelflaute' is hiervoor uit het Duits overgewaaid naar het Nederlandse vakjargon.

Waterstof laat zich gemakkelijker langdurig en in grote hoeveelheden opslaan dan elektriciteit en kan in die vorm soelaas bieden voor flexibele elektriciteitsproductie, met inzet van waterstof die eerder met elektrolyzers is geproduceerd uit duurzame elektriciteit (reconversie).

Deze vorm van elektriciteitsproductie wordt reconversie genoemd en is ook als optie opgenomen in II3050, met een minimum van 0 PJ en maximum van 129 PJ waterstof. Aangezien reconversie in 2050 maar maximaal een paar 100 uur per jaar zal plaatsvinden, bestaat er nog grote onzekerheid over het verdienmodel.

Het staat buiten kijf dat er uiteindelijk een bepaald vermogen aan flexibele elektriciteitsproductie nodig zal zijn. Hoe en met welke technieken dit precies vorm zal krijgen is nu nog onduidelijk.

Vanwege die grote onduidelijkheden is de arbeidsvraag door het onderdeel 'reconversie' niet gekwantificeerd in deze studie.

3.12 Fabricage van apparaatonderdelen

In het rapport uit 2018 is het onderdeel fabricage van onderdelen grof becijferd, met als uitgangspunt dat Nederland bijvoorbeeld onderdelen van elektrolyzers kan gaan produceren, die dan vervolgens worden geëxporteerd naar het buitenland.

Hoewel er in Nederland momenteel geen belangrijke producenten van elektrolyzers zijn, is de gehele waardenketen voor elektrolyzers wel aanwezig in Nederland. Vrijwel elke provincie heeft een aantal potentiële fabrikanten van (onderdelen van) elektrolyzers. In een analyse van FME en TNO is vastgesteld dat er minimaal 72 bedrijven zijn in Nederland die een potentiële rol zouden kunnen spelen in productie elektrolyseonderdelen (FME & TNO, 2020).

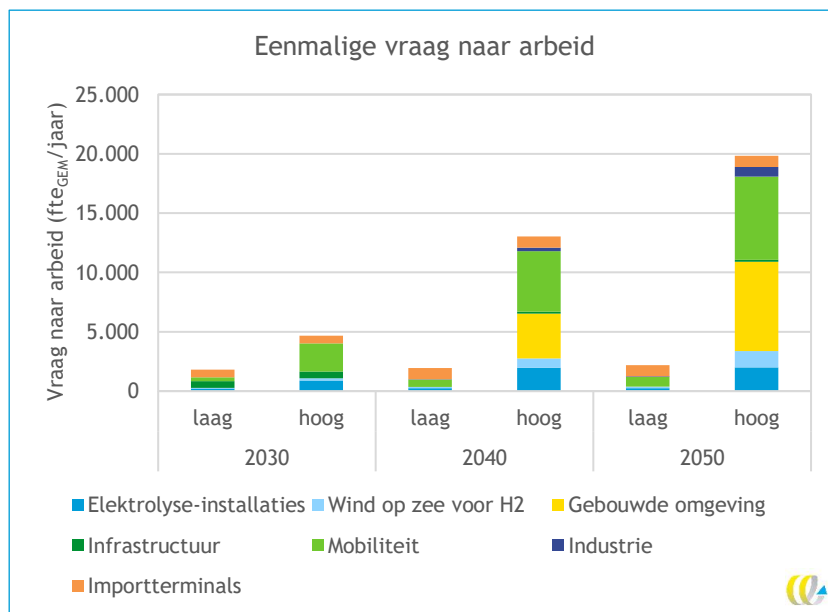
De belangrijkste producenten bevinden zich momenteel buiten Nederland, maar ook daar is het productieproces nog niet geautomatiseerd en zijn de ketens nog niet uitontwikkeld. Daarom kunnen de kansen voor de Nederlandse maakindustrie reëel zijn. In het onderzoek van FME en TNO staan gedetailleerde aanbevelingen om fabricage van elektrolyzers in Nederland te stimuleren. Onder andere door het opzetten van een nationaal onderzoek- en innovatieprogramma, het stimuleren van ketensamenwerking en het opstellen van (EU-) productstandaarden.

Hoewel de kansen dus reëel zijn, is dit onderdeel vanwege de onzekerheden in deze updatestudie niet gekwantificeerd.

3.13 Conclusie vraag naar arbeid

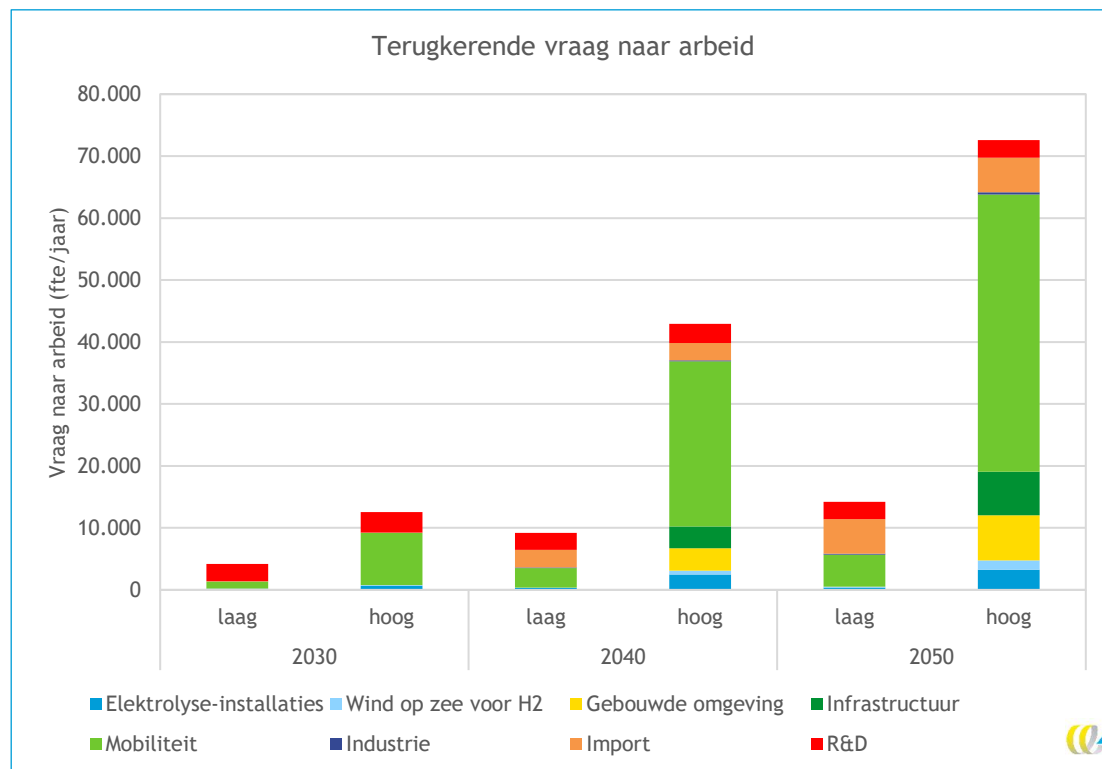
In dit hoofdstuk is de arbeidsvraag door groene waterstof per sector berekend. In **Figuur 8** is de eenmalige vraag naar arbeid grafisch weergegeven. Er komt naar voren dat er vooral in 2040 en 2050 een grote bandbreedte bestaat tussen het hoge en lage scenario. De cijfers voor importterminals zijn afgeleid van een reeds aangekondigd volume in de Havenvisie van Rotterdam en is daarom gelijk in beide scenario's.

Figuur 8 - Eenmalige vraag naar arbeid, naar sectoren



In Figuur 9 is de terugkerende vraag naar arbeid door groene waterstof grafisch weergegeven.

Figuur 9 - Terugkerende vraag naar arbeid, naar sectoren



Voor de terugkerende vraag naar arbeid geldt ook dat de verschillen tussen het lage en hoge scenario groot zijn, vooral na 2030. Daarnaast valt op dat mobiliteit in het hoge scenario een buitengewoon groot aandeel in de arbeidsvraag heeft. Ook bij de terugkerende vraag naar arbeid zijn de cijfers voor import gebaseerd op één toekomstbeeld en daarom zowel in het hoge als lage scenario gelijk.

Soort arbeid

Een belangrijk punt bij de inschatting van de toekomstige arbeidsvraag is het soort arbeid dat nodig is. De waterstofeconomie vertegenwoordigt weliswaar een nieuwe structuur, maar de benodigde arbeidsvraag heeft kenmerken die reeds bekend zijn in de energietransitie. In vrijwel alle sectoren die genoemd zijn in dit rapport (behalve R&D) bestaat de arbeidsvraag voor een groot gedeelte uit technisch geschoold personeel (mbo-techniek). Bij R&D gaat dit om universitair niveau. Binnen elke sector gelden er specifieke kwalificaties en de algemene deskundigheid zal gericht zijn op de eigenschappen van waterstof.

Volgens een recent rapport van Ecorys (2021) zijn er naar schatting (bruto) 23.000 extra werknemers nodig om de doelen uit het Klimaatakkoord te halen (-49% in 2030). Indien het doel wordt opgeschroefd door de Europese Green Deal (-55% in 2030), zal het tekort oplopen tot 28.000 (Ecorys, 2021). Maar terwijl het tekort oploopt, daalt het aanbod van mensen met technische kwalificaties juist sterk.

Zoals de studie van Ecorys (2021) duidelijk heeft gemaakt, zullen er waarschijnlijk al voor 2030 tekorten ontstaan aan technisch geschoolde arbeidskrachten die de uitdagingen van de klimaattransitie kunnen realiseren.

Als Nederland de ambities op klimaatgebied wil waarmaken, dient er geïnvesteerd te worden in het technisch lager beroepsonderwijs. Hiernaast kan bij- en omscholing bijdragen om de arbeidsvraag en het aanbod op elkaar aan laten sluiten.

4 Regionalisering

4.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is de vraag naar arbeid door groene waterstof in de verschillende sectoren besproken. Voor sommige sectoren zal dit verspreid over Nederland plaatsvinden, andere sectoren zijn sterk geconcentreerd. Deze verschillen kunnen van belang zijn bij het anticiperen op toekomstbeelden.

4.2 Verspreiding en clustering

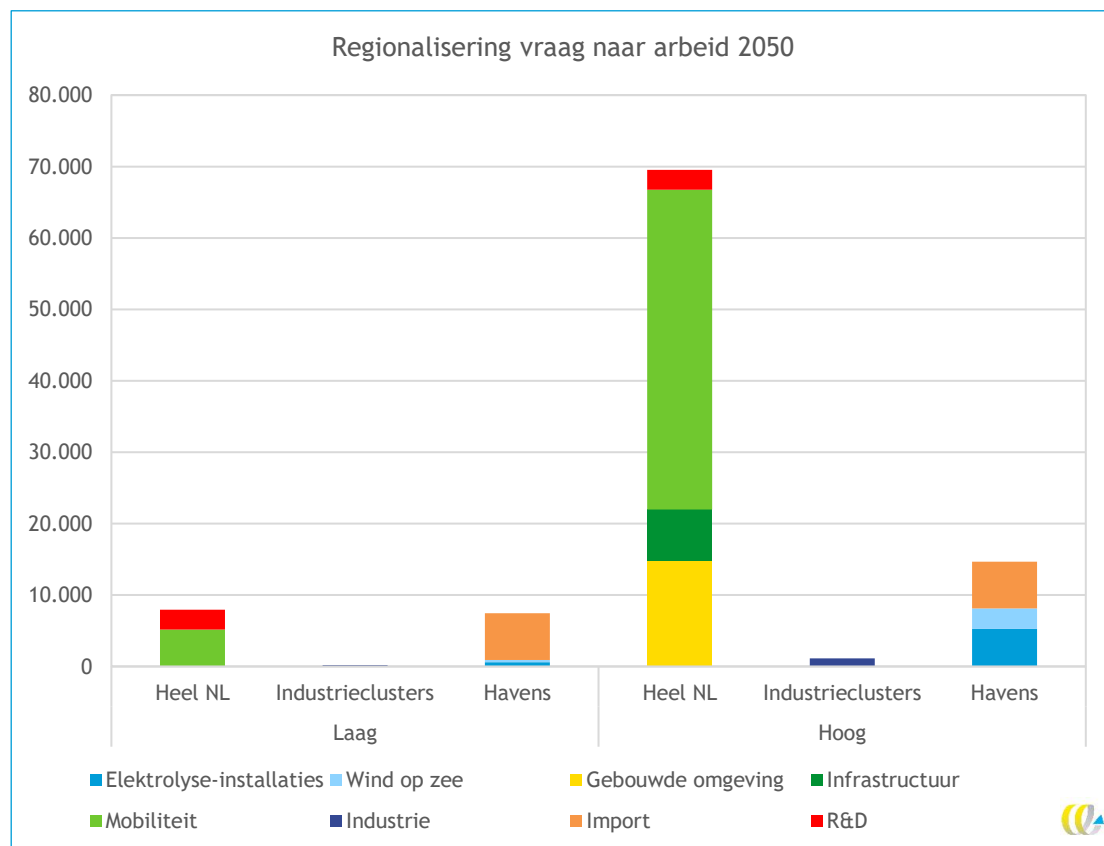
In dit hoofdstuk is een regionale toewijzing gemaakt op basis van Tabel 22. Een verdere volledige toedeling naar een specifieke haven of specifiek industriecluster van deze nationale cijfers is op basis van de in dit rapport verzamelde gegevens niet goed mogelijk, omdat van sommige ontwikkelingen nog niet duidelijk is waar ze precies zullen plaatsvinden. Dat geldt met name voor de elektrolyzers en importterminals.

Tabel 22 - Aanname regionale toewijzing vraag naar arbeid

	Heel Nederland	Industrieclusters	Havens
Wind op zee			✓
Elektrolyse			✓
Infrastructuur	✓		
Industrie		✓	
Gebouwde omgeving	✓		
Mobiliteit	✓		
R&D	✓		
Importterminals			✓

De aanname over regionale toewijzing kan gecombineerd worden met de vraag naar arbeid in de twee scenario's voor 2050. Hierbij zijn eenmalige en terugkerende banen bij elkaar opgeteld. Dit leidt tot het resultaat zoals weergegeven in Figuur 10.

Figuur 10 - Regionale toewijzing vraag naar arbeid in 2050



4.3 Conclusie regionalisering

Door de oververtegenwoordiging van mobiliteit en gebouwde omgeving in de arbeidsvraag van 2050, zal het gros van de arbeidsvraag over heel Nederland verdeeld zijn. Niettemin is de vraag naar arbeid die in de haven/industriegebieden gelokaliseerd zal zijn - relatief gezien - substantieel.

5 Additionele arbeid en vervanging

5.1 Inleiding

In dit rapport is de vraag naar arbeid berekend aan de hand van twee scenario's voor de waterstofvraag in 2050. Zoals beschreven in de methodologie is er in dit rapport uitgegaan van bruto banen. De berekende arbeidsvraag heeft dus betrekking op de banen die toegerekend kunnen worden aan groene waterstof. Er is dus niet gecorrigeerd voor het mogelijk verlies aan banen dat ook gepaard gaat met de introductie van waterstof.

Naast het verdwijnen van banen in de 'fossiele sector', is er sprake van vervanging van banen in veel downstream sectoren. Zo zal onderhoud van conventionele voertuigen overgaan in onderhoud van waterstofvoertuigen en installatie van hr-ketels overgaan in installatie van hybridewarmtepompen. Upstream in de waterstofketen ontstaan er nieuwe economische activiteiten (wind op zee, elektrolyzers) en is er sprake van nieuwe banen.

In dit hoofdstuk worden de cijfers die gepresenteerd zijn in de voorgaande hoofdstukken ingedeeld naar gelang het additionele dan wel vervangende karakter.

5.2 Terminologie

Er is sprake van een **additionele vraag** naar arbeid als de introductie van waterstof banen oplevert die geen directe voorganger hebben in de conventionele situatie (bijv. installatie elektrolyzers). Er is sprake van **vervanging** als de vraag naar arbeid teruggevoerd kan worden naar reeds bestaande banen (bijv. onderhoud aan een conventioneel voertuig gaat over in onderhoud aan een waterstofvoertuig).

In de economie wordt ook de term **verdringing** gebruikt. Deze term heeft betrekking op het functioneren van de arbeidsmarkt en treedt op als een (kortstondige) extra vraag naar arbeid ervoor zorgt dat werknemers de banen verkiezen met hogere lonen. Hierdoor kunnen bepaalde sectoren of segmenten verdrongen worden. Verdringing is altijd een gevolg van schaarste op de arbeidsmarkt. Dit fenomeen is niet onderzocht in dit hoofdstuk.

5.3 Additionaliteit en vervanging

In de praktijk is het onderscheid zeer lastig op betrouwbare wijze te maken omdat bijvoorbeeld additionele banen in principe kunnen worden ingevuld met werknemers uit andere sectoren (wat neer komt op verdringing). De gegeven indeling in dit hoofdstuk is daarom voornamelijk theoretisch.

Bij het vervangen van banen is het bovendien mogelijk dat er door efficiëntiewinst in dat segment van de waterstofketen per saldo een verlies optreedt van de arbeidsvraag in referentie met het segment in de conventionele economie. Dit punt blijft echter in dit hoofdstuk buiten beschouwing.

Bij de overgang naar een waterstof-georiënteerde economie speelt ook het risico op verdwijnen van banen een rol, zonder dat daar direct arbeidsplekken voor in de plaats komen. Deze factor is in dit rapport buiten beschouwing gebleven, maar wordt kort belicht in de situatie voor 2050.

5.4 Additionaliteit en vervanging in 2030

In 2030 speelt waterstof nog een beperkte rol en wordt de arbeidsvraag vooral gegenereerd door opbouw van de keten (aanleg van up- en midstream onderdelen). Zoals weergegeven in Tabel 23 is de vraag naar arbeid voornamelijk additioneel (nieuwe banen).

Tabel 23 - Eigenschap arbeidsvraag in 2030

Keten	2030		Fte	Eigenschap
	Sectoren			
Upstream	R&D	Terugkerend	2.815-3.321	Additioneel
	Wind op Zee	Eenmalig	38-178	Additioneel
		Terugkerend	15-76	Additioneel
	Elektrolyse	Eenmalig	229-900	Additioneel
		Terugkerend	172-688	Additioneel
Midstream	Infrastructuur	Eenmalig	573	Additioneel
	Import	Eenmalig	660	Additioneel
		Terugkerend	50	Additioneel
Downstream	Mobiliteit	Terugkerend	1.134-8.413	Vervanging
	Totaal additioneel		4.552-6.446	
	Totaal vervanging		1.134-8.413	

NB: De eenmalige arbeidsvraag (gemiddeld per jaar in een decennium) is hier als fte in 2030 opgevat.

Uit Tabel 25 blijkt dat de additionele arbeidsvraag in 2030 tussen de 4.552 en 6.446 fte ligt, terwijl de arbeidsvraag met een verdringend karakter tussen de 1.134 en 8.413 fte ligt.

5.5 Additionaliteit en vervanging in 2050

Na 2030 zal waterstof een bredere rol gaan spelen in de economie en zullen langzamerhand de fossiele alternatieven gaan verdwijnen. De gebruikte toekomstscenario's zijn immers klimaatneutraal in 2050, daar hoort een CO₂-neutrale energie & grondstoffenhuishouden bij. Wat betreft werkgelegenheid, levert dit voor 2050 een andere situatie op dan in 2030. Naast additionele arbeid en vervanging van banen zullen er sectoren in de economie het risico lopen geheel te verdwijnen. Dit gaat voornamelijk om de sectoren die volledig gericht zijn op fossiele brandstoffen. In deze sectoren werken momenteel enkele duizenden mensen, zie Tabel 24.

Tabel 24 - Werkgelegenheid in volledig fossiele sectoren

Sector	Fte
Winning van aardolie en aardgas	2.800
Aardolie-industrie	5.400
Petrochemische industrie	5.300
Groothandel in olie en steenkool	5.300

Bron: (CBS Statline, 2018).

Deze banen gaan in de huidige vorm verdwijnen. Als waterstof de rol van fossiele energiedragers overneemt, zal er hoogstwaarschijnlijk in enige mate een transfer plaatsvinden van bovenstaande banen naar additionele arbeidsplaatsen in de waterstofeconomie. Nochtans bestaat hier geen zekerheid over en de banen zijn dus niet in mindering gebracht bij de

additionele vraag naar arbeid in 2050. Enkel het cijfer voor groothandel in olie en steenkool is als referentie gebruikt voor groothandel in waterstof, zie Paragraaf 3.10.

Voor 2050 geldt in nog sterkere mate dan voor 2030 dat scheiding tussen additioneel en vervanging in de praktijk lastig te maken zal zijn. Daarnaast zal waterstof in 2050 veel meer geïntegreerd zijn in de gehele economie (via eigen productie dan wel import) en zullen meer sectoren dan genoemd direct of indirect met waterstof te maken hebben.

In Tabel 25 is een inschatting gegeven van de additionaliteit van de arbeidsvraag in 2050. Zoals weergegeven speelt vervanging alleen mid- en downstream een rol. Upstream is alles additioneel.

Tabel 25 - Eigenschap arbeidsvraag 2050

Keten	2050		Fte	Eigenschap	Equivalent in conventionele economie
	Sectoren				
Upstream	R&D	Terugkerend	2.767-2.803	Additioneel	
	Wind op Zee	Eenmalig	146-1.359	Additioneel	
		Terugkerend	156-1.516	Additioneel	
	Elektrolyse	Eenmalig	235-2.004	Additioneel	
		Terugkerend	361-3.262	Additioneel	
Midstream	Infrastructuur	Eenmalig	161	Additioneel	
		Terugkerend	0-7.000	Vervanging	Onderhoud en exploitatie aardgasnetwerk
	Import	Eenmalig	943	Additioneel	
		Terugkerend	5.600	Vervanging	Deels groothandel in fossiele brandstoffen
Downstream	Industrie (energetisch)	Eenmalig	51-794	Additioneel	
		Terugkerend	142-336	Vervanging	
	Gebouwde omgeving	Eenmalig	0-7.534	Additioneel	
		Terugkerend	0-7.281	Vervanging	Onderhoud en productie aardgas cv-ketels
	Mobiliteit	Eenmalig	815-7.026	Additioneel	
		Terugkerend	5.164-44.770	Vervanging	Onderhoud conventionele voertuigen
	Totaal additioneel		5.635-27.402		
	Totaal vervanging		10.906-64.987		

NB: De eenmalige arbeidsvraag (gemiddeld per jaar in een decennium) is hier als fte in 2030 opgevat.

Uit Tabel 25 komt naar voren dat de vervanging van arbeidsvraag in 2050 weliswaar hoger is dan de additionele arbeidsvraag, maar dat ook dat laatste substantieel kan zijn in het hoge scenario.

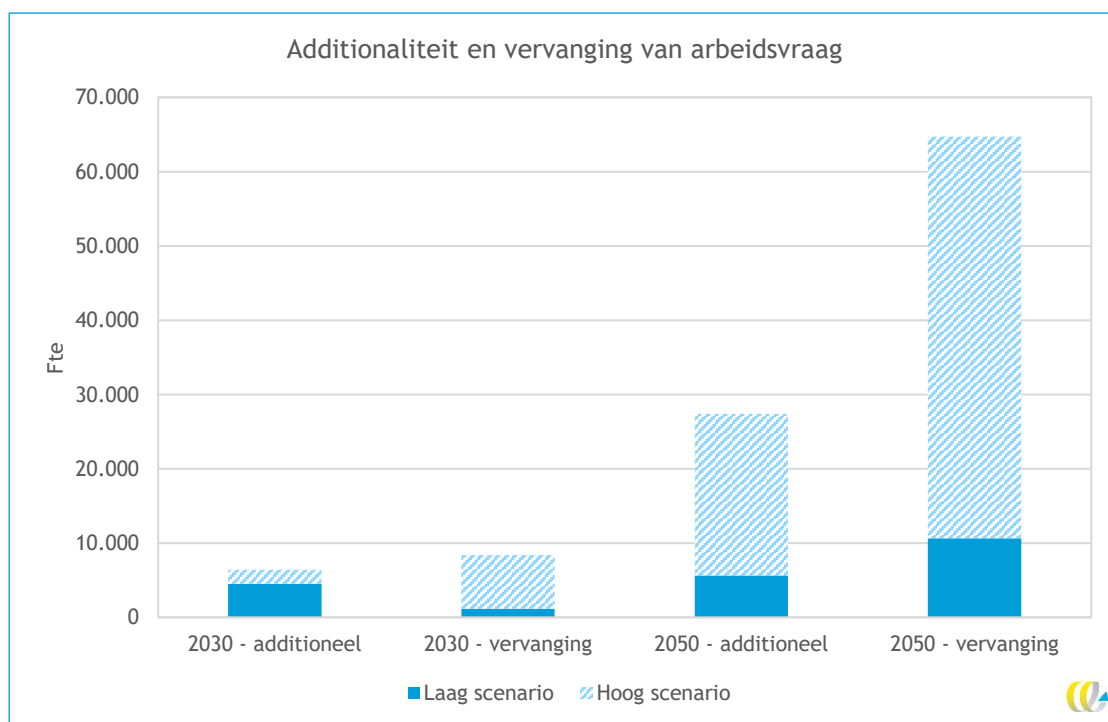
5.6 Conclusie additionele arbeid en vervanging

In dit hoofdstuk is een inschatting gemaakt voor het aandeel additionele en vervangende banen in de waterstofeconomie. De bredere arbeidsvraag die zal doorsijpelen naar de rest van de economie (indirecte banen), efficiëntiewinst in de waterstofketen ten opzichte van de conventionele keten en het verlies van banen die verbonden zijn met fossiele brandstoffen of hoge uitstoot vielen buiten de scope van de studie.

In Figuur 11 zijn de cijfers van additionaliteit en vervanging voor 2030 en 2050 naast elkaar gezet. Er komt naar voren dat het grootste gedeelte van de arbeidsvraag terechtkomt bij vervangende banen.

Het relatief hoge aandeel van het lage scenario bij de additionele banen in 2030 is voornamelijk toe te schrijven aan R&D. Daarnaast valt op dat het hoge scenario voor zowel additionele als vervangende banen in 2050 een zeer groot verschil kan maken.

Figuur 11 - Additionaliteit en vervanging van de arbeidsvraag in 2030 en 2050



6 Conclusies

Door middel van elektrificatie kan een deel van het energiesysteem klimaatneutraal worden gemaakt. Maar de behoefte aan moleculen - als energiedrager en als grondstof - zal blijven bestaan. Voor deze rol kan groene waterstof worden ingezet. Als met duurzaam opgewekte elektriciteit waterstof wordt gemaakt, ontstaat er een energiedrager van hoge energiedichtheid, die op CO₂-neutrale wijze de rol van fossiele brandstoffen kan overnemen.

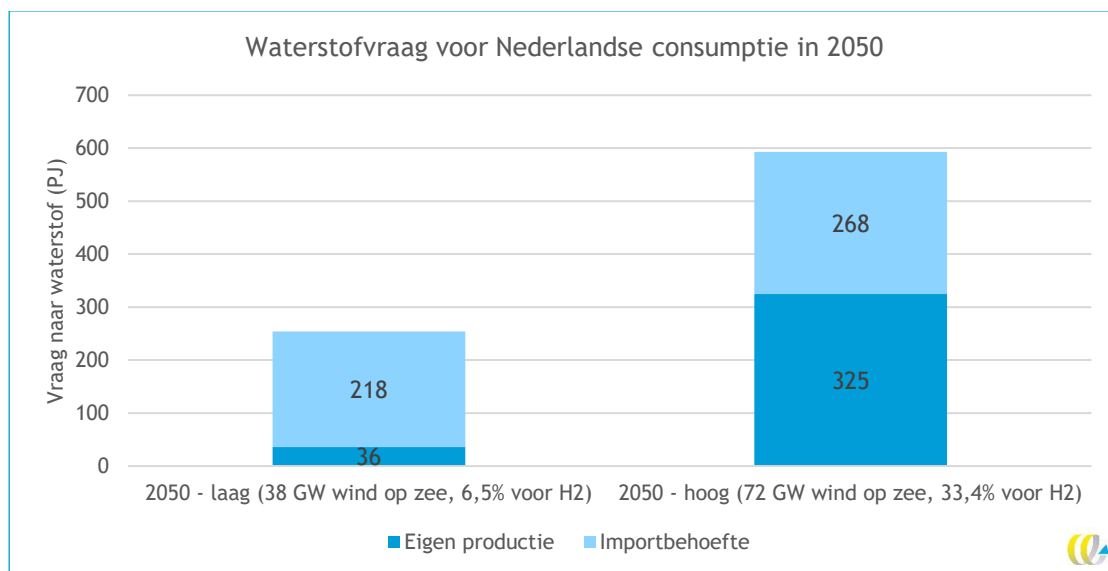
In dit rapport is onderzocht welke arbeidsvraag er verbonden kan worden aan de introductie van groene waterstof in onze economie in 2030 en richting 2050. Het rapport is een update en uitbreiding van de studie die CE Delft in 2018 heeft uitgevoerd.

Laag en hoog scenario

Om de arbeidsvraag te berekenen is er gebruikgemaakt van een laag en hoog klimaatneutraal scenario voor 2050. In het lage scenario is zowel de vraag als de Nederlandse productie van groene waterstof minimaal. In het hoge scenario zijn deze maximaal. Voor 2030 komt het maximale scenario overeen met het Klimaatakkoord (4 GW geïnstalleerd vermogen aan elektrolyse). Het minimale scenario gaat uit van 1 GW.

Voor 2050 komt het lage scenario uit op 254 PJ en het hoge scenario op 594, zie Figuur 12.

Figuur 12 - Waterstofvraag



Bovenop het eigen verbruik van groene waterstof is het mogelijk dat Nederland een belangrijke positie verwerft bij de import van groene waterstof voor doorvoer en voor de lucht- en scheepvaart. De potentiële arbeidsvraag die hieruit voortkomt is aangenomen gelijk te zijn in het lage en hoge scenario.

Arbeidsvraag in laag en hoog scenario

In deze studie is de arbeidsvraag in bruto banen berekend, dat wil zeggen dat er niet noodzakelijkerwijs sprake is van uitsluitend additionele banen. Bij het berekenen van de arbeidsvraag is onderscheid gemaakt tussen eenmalige en terugkerende arbeid, waarbij het eerste betrekking heeft op aanleg en bouw, en het tweede op onderhoud en exploitatie. Voor eenmalige arbeid is een gemiddelde genomen van elk decennium (voorafgaand aan het gegeven jaartal) omdat er zeer sterke pieken in deze arbeidsvraag kunnen voorkomen.

Eenmalige vraag naar arbeid is uitgedrukt in gemiddelde full time equivalents (fte) per jaar. Terugkerende vraag naar arbeid is uitgedrukt in fte per jaar op een bepaald tijdstip. Tabel 26 geeft een overzicht van de onderzoeksresultaten.

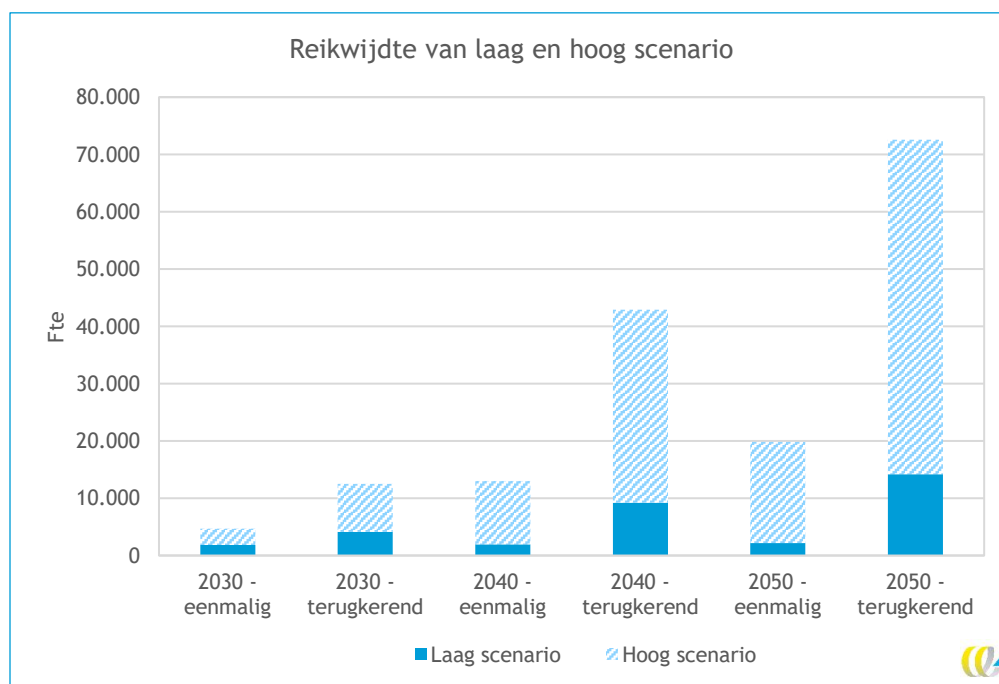
Tabel 26 - Overzicht van vraag naar arbeid (afgerond op honderdtallen)

Jaar	Totale eenmalige vraag naar arbeid (gemiddeld, in fte/jaar)	Terugkerende vraag naar arbeid (in fte/jaar)
2030	1.800-4.700	4.200-12.500
2040	2.000-13.000	9.200-43.000
2050	2.200-20.000	14.200-72.600

In Figuur 13 is het verschil in arbeidsvraag tussen het laag en hoog scenario weergegeven voor eenmalige en terugkerende banen. Er komt duidelijk naar voren dat de ruime verdeling van de waterstofvraag in het hoge scenario ten opzichte van het lage scenario, de arbeidsvraag in 2040 en 2050 met minimaal een factor vier doet stijgen.

Er is kortom een groot niet-lineair verschil in arbeidsvraag tussen het lage en het hoge scenario.

Figuur 13 - Verschil tussen laag en hoog scenario in arbeidsvraag

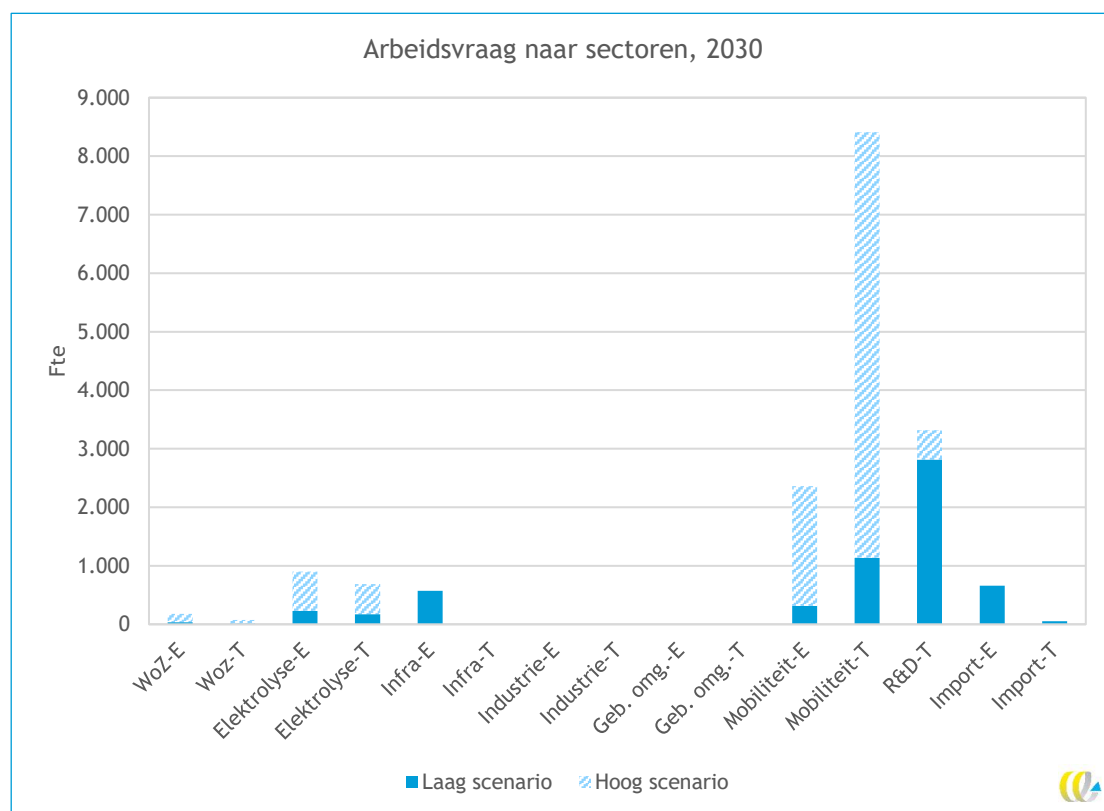


Arbeidsvraag per sector

Gebaseerd op de waterstofvraag per sector is met behulp van een model de arbeidsvraag per sector berekend. Voor import is er gebruikgemaakt van een toekomstscenario met één volume. Hier is dus geen verschil tussen een laag en hoog scenario. In de volgende twee figuren is de arbeidsvraag per sector weergegeven voor 2030 en 2050. Per sector is er (behalve bij R&D) een eenmalige en terugkerende vraag naar arbeid.

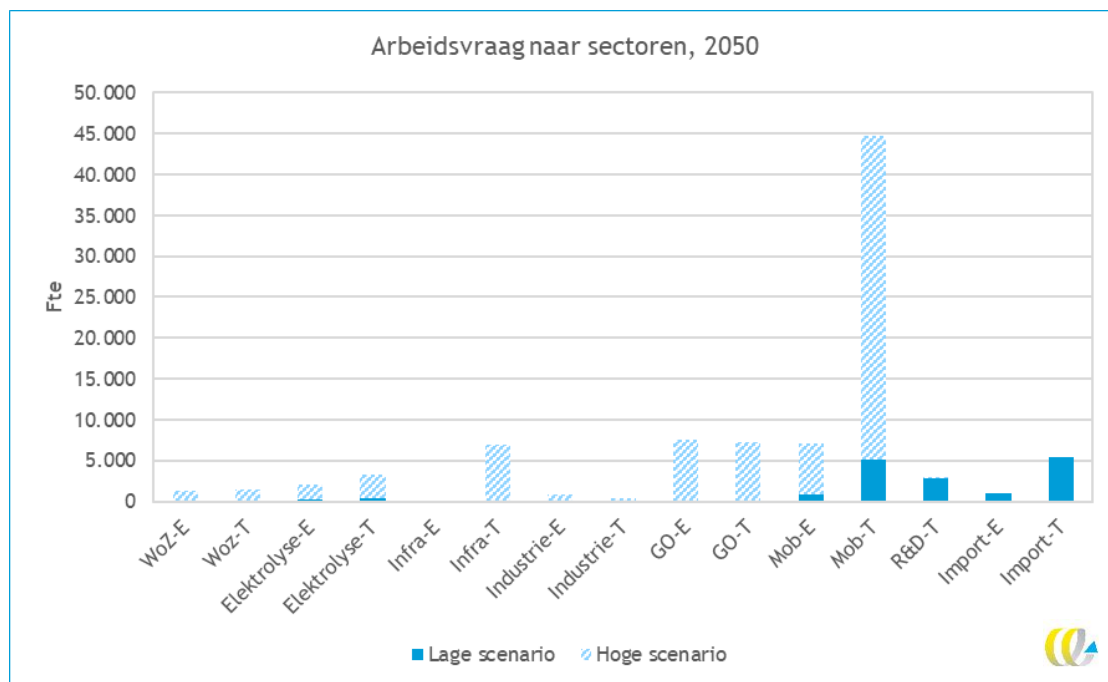
In 2030 wordt groene waterstof nog niet breed ingezet en wordt de arbeidsvraag vooral gegenereerd bij R&D en mobiliteit. Ook de aanleg van importterminals en de waterstof-backbone zorgen voor arbeidsvraag, in zowel het lage als hoge scenario.

Figuur 14 - Arbeidsvraag per sector, 2030



In 2050 is de arbeidsvraag in meerdere sectoren aanwezig, maar vooral prominent bij het hoge scenario. In het lage scenario zal er alleen een beperkte arbeidsvraag plaatsvinden bij mobiliteit en import.

Figuur 15 - Arbeidsvraag per sector, 2050



Duiding van de resultaten

De resultaten van deze studie komen voort uit twee specifieke scenario's: allebei klimaat-neutraal maar met een hele andere positie van waterstof. Beide scenario's zijn niet onrealistisch maar het is goed mogelijk dat de werkelijkheid uiteindelijk ergens in het midden komt te liggen. Waterstof zal echter onherroepelijk een grotere rol gaan spelen dan nu, en daarom moet in het lage scenario alsnog een groot aandeel worden geïmporteerd om in de behoeften te voorzien.

Logischerwijs heeft de variatie van scenario's invloed op de arbeidsvraag die gegenereerd wordt door groene waterstof. In deze studie is naar voren gekomen dat het hoge scenario een buitengewone groei van de arbeidsvraag met zich meebrengt. In het lage scenario speelt waterstof een belangrijke rol in de economie maar is de arbeidsvraag die eruit voortkomt relatief beperkt.

Waar hangen de scenario's van af?

De mogelijkheid dat de werkelijkheid meer richting het hoge scenario beweegt, hangt af van een aantal factoren, waarbij een concrete (beleids-)keuze het verschil kan maken.

Ten eerste is er een vraagstuk over het opgestelde vermogen wind op zee (38 of 72 GW).

Ten tweede dient de markt voor groene waterstof - in het algemeen - tot ontwikkeling te komen. De eerste tekenen aan de horizon wijzen inderdaad die richting uit. Voor dit punt is echter ook de kostprijs van groene waterstof van belang (ten opzichte van alternatieven), dit viel echter buiten de scope van deze studie.

Ten derde kunnen de afzonderlijke sectoren voor hun ontwikkeling richting het hoge scenario ook afhankelijk zijn van specifieke beleidskeuzen en maatregelen. Dit geldt in het bijzonder voor sectoren waar groene waterstof niet de enige klimaatneutrale oplossing vertegenwoordigt (gebouwde omgeving, mobiliteit).

Maar ook in andere sectoren kan de ontwikkeling afhangen van stimulerende maatregelen. Het gaat dan niet alleen om investeringen, maar ook om standaardisatie van producten, ketenintegratie en onderzoek en innovatie.

Soort arbeid

In vrijwel alle sectoren die genoemd zijn in dit rapport bestaat de arbeidsvraag voor een groot gedeelte uit technisch geschoold personeel (mbo-techniek). Binnen elke sector gelden er specifieke kwalificaties en de algemene deskundigheid zal gericht zijn op de eigenschappen van waterstof.

Volgens een recent rapport van Ecorys (2021) zal er in de energietransitie in 2030 een tekort zijn aan (bruto) 23.000 tot 28.000 werknemers (Ecorys, 2021). Maar terwijl het tekort oploopt, daalt het aanbod van mensen met technische kwalificaties juist sterk.

Zoals de studie van Ecorys (2021) duidelijk heeft gemaakt, zullen er waarschijnlijk al voor 2030 tekorten ontstaan aan technisch geschoolde arbeidskrachten die de uitdagingen van de klimaattransitie kunnen realiseren.

Als Nederland de ambities op klimaatgebied wil waarmaken, dient er geïnvesteerd te worden in het technisch lager beroepsonderwijs. Hiernaast kan bij- en omscholing bijdragen om de arbeidsvraag en het aanbod op elkaar aan laten sluiten.

Literatuur

- Aymelek. 2014. *Top 10 bunkering points for shipping world* [Online]. Available: www.researchgate.net/figure/Top-10-bunkering-points-for-shipping-world_tbl1_274379729 [Accessed].
- Berenschot & Kalavasta, 2020. *Klimaatneutrale energiescenario's 2050, scenariostudie*. Utrecht, Berenschot.
- CBS. 2019. *Research and development* [Online]. Available: <https://longreads.cbs.nl/ict-kennis-en-economie-2019/research-en-development/> [Accessed 2021].
- CBS. 2020. *Investerings in energie en de daarmee gepaard gaande werkgelegenheid* [Online]. Available: www.cbs.nl/nl-nl/longread/diversen/2020/economische-ontwikkeling-van-de-energievoorziening/4-investerings-in-energie-en-de-daarmee-gepaard-gaande-werkgelegenheid [Accessed 2021].
- CBS Statline. 2018. *Bedrijfsleven; arbeids- en financiële gegevens, per branche* [Online]. CBS. Available: <https://opendata.cbs.nl/statline/?dl=1E0B8#/CBS/nl/dataset/81156ned/table> [Accessed].
- CBS Statline. 2021a. *Arbeidskosten; structuur arbeidskosten, bedrijfsklasse SBI2008, 2016* [Online]. CBS. Available: www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/84157NED [Accessed].
- CBS Statline. 2021b. *Cao-lonen, contractuele loonkosten en arbeidsduur; indexcijfers* [Online]. CBS. Available: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82838NED/table> [Accessed].
- CE Delft, 2017. *Net voor de toekomst. Netbeheer Nederland*.
- CE Delft, 2018a. *Waterstofroutes Nederland : Blauw, groen en import*. Delft, CE Delft.
- CE Delft, 2018b. *Werk door groene waterstof*. Delft, CE Delft.
- CE Delft, 2020. *Elektrificatie en Vraagprofiel 2030*. Delft, CE Delft.
- CE Delft, 2021. *STREAM Goederenvervoer 2020 (versie 2)*. Delft, CE Delft.
- DNV GL, 2020. *Noordzee Energie Outlook*. Arnhem, DNV GL Netherlands B.V.
- ECN, 2016. *Methodiek werkgelegenheid energie : Achtergrondrapport bij de Nationale energieverkenning 2015*. Petten ECN.
- Ecorys, 2021. *Klimaatbeleid en de arbeidsmarkt : Een verkennende studie naar de werkgelegenheidseffecten van CO₂-reductiemaatregelen* Rotterdam, Ecorys.
- EPA, 2010. *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from industrial, commercial and institutional boilers*. US Environmental Protection Agency (EPA).
- FCH JU, 2015. *Fuel Cell Electric Buses - Potential For Sustainable Public Transport In Europe*. München, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU).
- FCH JU, 2019. *Hydrogen Roadmap Europe Report*. Luxembourg, Publications Office of the European Union.

- FCH JU, 2020. Fuels cells hydrogen trucks. Brussels, Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU).
- FME & TNO, 2020. Elektrolyzers : kansen voor de Nederlandse maakindustrie. FME; TNO.
- Gasunie. 2021a. *Gasunie versnelt investeringen voor de energietransitie* [Online]. Available: www.gasunie.nl/nieuws/gasunie-versnelt-investeringen-voor-de-energietransitie [Accessed 2021].
- Gasunie. 2021b. *Jaarverslag 2020* [Online]. Available: [www.gasuniereport2020.nl/downloaden-als-pdf/\\$1894/\\$1895](http://www.gasuniereport2020.nl/downloaden-als-pdf/$1894/$1895) [Accessed 2021].
- Gate terminal. 2007. *Investeringsbeslissing gate terminal* [Online]. Available: www.gateterminal.com/nieuwsberichten-archive/1168/ [Accessed 2021].
- Global Maritime Forum. 2020. *The scale of investment needed to decarbonise international shipping* [Online]. Available: www.globalmaritimeforum.org/news/the-scale-of-investment-needed-to-decarbonize-international-shipping [Accessed 2021].
- Groningen Seaports. 2019. *Jaarverslag 2018* [Online]. Available: www.groningen-seaports.com/wp-content/uploads/JAARVERSLAG-2018-def.pdf [Accessed 2021].
- Havenbedrijf Rotterdam, 2020. Haven van Rotterdam wordt internationale waterstofhub. Rotterdam, Havenbedrijf Rotterdam.
- Hinicio & Tractebel, 2017. Study on early business cases for H₂ in energy storage and more broadly power to H₂ applications. Brussels, Tractebel Engineering S.A.
- JRC, 2020. JEC Well-To-Wheels report v5. Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- Kamer van Koophandel. 2021. *Handelsregister* [Online]. Available: www.kvk.nl/producten-bestellen/bedrijfsproducten-bestellen/uittreksel-handelsregister/ [Accessed 2021].
- KIWA, 2018. Toekomstbestendige Gasdistributienetten. Apeldoorn, Kiwa Technology B.V.
- Knol & Coolen, 2019. *Employment analysis (2019-2023) of various fields of activities in the Dutch offshore wind sector*, RVO (Netherlands Enterprise Agency); TKI Wind op Zee.
- Knol & Coolen, 2020. Post 2030 offshore wind employment in the Netherlands : First indications of an outlook on direct employment regarding construction and operations & maintenance phases. RVO.
- Maritime Fairtrade. 2019. *Top ten bunkering ports* [Online]. Available: <https://maritimefairtrade.org/top-ten-bunkering-ports/> [Accessed 2021].
- OECD. 2016. *OECD Taxonomy of Economic Activities Based on R&D Intensity* [Online]. Paris: OECD. Available: www.oecd-ilibrary.org/docserver/5jlv73sqqp8r-en.pdf?expires=1616443201&id=id&accname=guest&checksum=DA2E1DEBAB16FAEC124275A1E28A7CDE [Accessed 2021].
- Oldenbroek, Wiltzes, Blok & van Wijk, 2021. Fuel cell electric vehicles and hydrogen balancing 100 percent renewable and integrated national transportation and energy systems. *Energy Conversion and Management*: X, 9, 100077.
- Reijerkerk & van Rhee, 2019. Waterstof : kansen voor de Nederlandse industrie. Zoetermeer, FME.
- SEI, 2014. Hydrogen-Based Energy Conversion : More than Storage: System Flexibility. The Hague, SBG Energy Institute (SEI).



- Shell. 2020. *Shell exits lake Charles LNG Project* [Online]. Shell. Available: www.shell.com/media/news-and-media-releases/2020/shell-exits-proposed-lake-charles-lng-project.html [Accessed 2021].
- Smolinka, Wiebe, Sterchele, Palzer, Lehner, Jansen, Kiemel, Miehe, Wahren & Zimmermann, 2018. *Studie IndWEde: Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*.
- TNO. 2020. *Technology factsheet, H₂ industrial boiler* [Online]. Available: https://energy.nl/wp-content/uploads/2020/09/H2IndustrialBoiler_28092020.pdf [Accessed 2021].
- US DOE, 2002. *Process Equipment Cost Estimation*. Washington D.C, United States Department of Energy (US DOE).



A Vergelijking met vorige rapport uit 2018

A.1 Scenario's

De inschatting voor 2050 was in het vorige rapport gebaseerd op twee scenario's uit 'Net voor de Toekomst' (de voorloper van II3050): de ondergrens werd gevormd door het toekomstbeeld 'generieke sturing' en de bovengrens door 'regie nationaal' (CE Delft, 2017). Cijfers uit de 2018-studie zijn voor de onderhavige studie gewijzigd op basis van voortschrijdende inzichten die opgenomen zijn II3050.

In Tabel 27 is een vergelijking gegeven van de gebruikte scenario's in het huidige en vorige rapport.

Tabel 27 - Vergelijking scenario's voor 2030 en 2050 in vorige en huidige rapport.
Alle cijfers zijn in PJ waterstof, tenzij anders aangegeven in de specifieke tabelregel

	Vorig rapport			Huidig rapport		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Laag scenario						
Wind op Zee (GW)	-	-	-	1	11,5	38
Elektrolyse (GW)	0	0,22	13	0	1	3,8
Import**	-	-	-	0	0	218
Totale vraag H ₂ *	0	2,7	164,2	0	10	254
HT-warmte industrie	-	-	-	0	0	95
Grondstof t.b.v. industrie	-	-	-	0	0	14
LT-warmte gebouwde omgeving	0	0	0	0	0	0
Transport	0	0	22	0	2,7	12
Hoog scenario						
Wind op Zee (GW)	-	-	-	1	11,5	72
Elektrolyse (GW)	0	4	45	0	4	34,7
Import**	-	-	-	0	0	268
Totale vraag H ₂ *	0	50	560,7	0	40	593
HT-warmte industrie	-	-	-	0	0	225
Grondstof t.b.v. industrie	-	-	-	0	20	134
LT-warmte gebouwde omgeving	0	0	203,2	0	0	54
Transport	0	20	96,7	0	20	104

* In de totale vraag zijn ook grondstof voor de industrie, elektriciteitsvoorziening en transportverliezen opgenomen.

** Dit is alleen de import die direct bijdraagt aan de vraag voor Nederlandse consumptie.

A.2 Resultaten

De uitkomsten van de huidige studie en de studie uit 2018 zijn niet goed met elkaar te vergelijken.

De belangrijkste oorzaken van verschil worden hieronder benoemd. De belangrijkste factor die zorgt voor verschil (binnen de sectoren) komt voort uit verschillen tussen de gebruikte scenario's, zie Tabel 27. Dit verklaart de grote verschillen bij de sectoren elektrolyse, mobiliteit en gebouwde omgeving.

Ten tweede is de scope van dit rapport anders, zie Paragraaf 1.1. De export van elektrolyseronderdelen is niet meer gekwantificeerd, maar wind op zee, industrie, R&D en waterstofimport wel.

Ten derde was bij het onderdeel elektrolyse in het vorige rapport de vraag naar waterstof direct vertaald in het opgesteld vermogen van elektrolyzers. In dit rapport is het vermogen elektrolyse afgeleid van het aandeel dat er uit wind op zee beschikbaar is voor de productie van waterstof (met dus ook nog een rol voor import).

Ten vierde is in dit rapport de productie van bussen en vulstations niet als terugkerende maar als eenmalige arbeid gerekend.

Naast de verschillende scenario's en opgenomen sectoren, zijn ook vele aannames geüpdatet op basis van voortschrijdende inzichten. Zo zijn arbeidsproductiviteitscijfers, kentallen van voertuigefficiëntie, jaarkilometrages en arbeidsuren voor installatie hernieuwd. Voor een volledige vergelijking van de aannames verwijzen we naar aannames in de bijlage van dit rapport en de aannames in de bijlage van het vorige rapport.

In Tabel 28 staat een vergelijking van de resultaten per sector tussen het vorige en het huidige rapport, met dus de aantekening dat er verschillende aannames achter zitten.

Tabel 28 - vergelijking resultaten CE Delft-rapport uit 2018 met huidig rapport

		Vorig rapport		Huidig rapport	
		2030	2050	2030	2050
Laag scenario					
Wind op Zee	Eenmalig	-	-	38	146
	Terugkerend	-	-	15	156
Elektrolyse	Eenmalig	60	850	229	235
	Terugkerend	41	1431	172	361
Gebouwde omgeving	Eenmalig	0	0	0	0
	Terugkerend	0	0	0	0
Industrie (energetisch)	Eenmalig	-	-	0	51
	Terugkerend	-	-	0	142
Infrastructuur	Eenmalig	500	0	573	0
	Terugkerend	-	-	0	0
Mobiliteit	Eenmalig	0	0	315	815
	Terugkerend	0	15.147	1.134	5.164
Export	Eenmalig	0	0	-	-
	Terugkerend	743	1.119	-	-
R&D	Terugkerend	-	-	2.815	2.767
Import	Eenmalig	-	-	660	943
	Terugkerend	-	-	50	5.600

		Vorig rapport		Huidig rapport	
		2030	2050	2030	2050
Hoog scenario					
Wind op Zee	Eenmalig	-	-	178	1.359
	Terugkerend	-	-	76	1.516
Elektrolyse	Eenmalig	976	2.967	900	2.004
	Terugkerend	747	4.885	688	3.262
Gebouwde omgeving	Eenmalig	0	1.795	0	7.534
	Terugkerend	0	5.448	0	7.281
Industrie (energetisch)	Eenmalig	-	-	0	794
	Terugkerend	-	-	0	336
Infrastructuur	Eenmalig	500	-	573	161
	Terugkerend	-	-	0	7.000
Mobiliteit	Eenmalig	0	0	2.360	7.026
	Terugkerend	14.468	62.547	8.413	44.770
Export	Eenmalig	0	0	-	-
	Terugkerend	1.239	1.865	-	-
R&D	Terugkerend	-	-	3.321	2.803
Import	Eenmalig	-	-	660	943
	Terugkerend	-	-	50	5.600

B Aannames

In deze bijlage zijn nadere details van de gehanteerde aannames opgenomen.

Tabel 29 - Aannames berekening vraag naar arbeid door wind op zee voor waterstof

Aanname	2020	2030	2050 - laag	2050 - hoog	
Percentage WoZ naar H ₂	0	1,9-9,6	6,5	33,4	(Berenschot & Kalavasta, 2020)
Lineair oplopend vanaf 2023					
Toelevering funderingen (fte/GW) – Vnl. metaalbewerking en coating – Ingenieurs – Procesingenieurs – Logistiek	354	1.311	1.126	1.126	(Knol & Coolen, 2019, Knol & Coolen, 2020); persoonlijke correspondentie
Installatie (fte/GW) – Scheepsbemanning – Offshore wind staff (vnl. techniciens) – Onshore pre-installateurs – Kabelleggers	325	443	391	391	
Onderhoud (fte/GW) – Scheepsbemanning – Offshore wind staff (vnl. techniciens)	88	69	63	63	
Vertegenwoordigingen windbedrijven	437	+1%/bijgeplaatst GW vermogen			Handelsregister, KvK
Productie-onderdelen in NL	Nee	Nee	Nee	Nee	
Installatie & onderhoud gebaseerd op GW, niet naar vervanging windmolens gekeken.					
Installatie windmolens evenredig verdeeld over de jaren.					

Tabel 30 - Aannames berekening vraag naar arbeid door elektrolyzers

Aanname		Bron
Kental efficiëntie	60% (55 kwh/kg H ₂)	Hydrogen-Based Energy Conversion (SEI, 2014)
Draaiuren per jaar	4.500 uren/jaar	Rekenmodel, "Waterstofroutes Nederland. Blauw, groen en import" (CE Delft, 2018a)
Arbeidskosten per voltijdeenheid (€/fte)	CBS Arbeidskosten per voltijdeenheid 2016, gemiddelde van de sectoren: – 41 Algemene bouw en projectontwikkeling – 43 Gespecialiseerde bouw	CBS

Aanname				Bron
	– 33 Reparatie en installatie van machines			
Elektrolyzers	– Alkaline (t/m 2030) – PEM (vanaf 2030)			
Non-equipment costs Alkaline electrolyser (€/kWe)	2020	2030	2050	(Hinicio & Tractebel, 2017)
	236	156	95	
Non-equipment costs investement PEM electrolyser (€/kWe)	2020	2030	2050	Ibid.
	528	186	80	
Non-equipment costs O&M Alkaline electrolyser (€/kWe)	2020	2030	2050	Ibid.
	14	10	7	
Non-equipment costs O&M investement PEM electrolyser (€/kWe)	2020	2030	2050	Ibid.
	21	12	7	
Kostenberekening tussenliggende jaren	Lineair			
Non-equipment costs: 1. DCS and EMU costs 2. engineering costs 3. Interconnection, commissioning and start-up costs	– Als % van equipment costs en aandelen van afzonderlijke onderdelen gelijk voor PEM en Alkaline – Aandelen blijven gelijk voor 2020, 2030 en 2050 – Respectievelijk 10, 15 en 20% voor 2.5 MW			(Hinicio & Tractebel, 2017)
Non-equipment O&M (includes site management, land rent and taxes, administrative fees (insurances, legal fees...), site maintenance)	– 0,04% van non-equipment costs – Gelijk voor huidig, 2030, 2050 – Gelijk voor PEM en Alkaline			Ibid.

Tabel 31 - Aannames kosten elektrolyzers

		2020	2030	2050
PEM (10 MW)	Levensduur (jaren)	20	23	27
	CAPEX (€/kW)	1470	810	510
	stack (%)	50	48	40
	power supply (%)	15	16	20
	gas cleaning (%)	13	12	14
	BoP (%)	22	24	26
	OPEX (€/kW)			
	O&M	13	9	7
Alkaline	Levensduur (jaren)	27	28	30
	CAPEX (€/kW)	920	690	500
	stack (%)	45	41	n/a
	power supply (%)	20	24	n/a
	gas cleaning (%)	20	15	n/a
	BoP (%)	15	20	n/a
	OPEX (€/kW)			
	O&M	19	24	26

Bronnen: (Hinicio & Tractebel, 2017, Smolinka et al., 2018).

Tabel 32 - Ontwikkeling arbeidsproductiviteit ten opzichte van 2016

Sectoren	Euro/fte (2016)	Euro/fte (2020)
26 Elektrotechnische industrie	81.800,00	92.042,24
27 Elektrische apparatenindustrie	72.500,00	81.577,78
28 Machinebouw	68.300,00	76.851,90
29 Productie bussen/auto- aanhangwagenindustrie	62.000,00	69.763,07
33 Reparatie en installatie van machines	74.200,00	83.490,64
41 Algemene bouw en projectontwikkeling	65.800,00	72.835,39
43 Gespecialiseerde bouw	57.100,00	63.205,18
45 Onderhoud voertuigen/autohandel & reparatie	50.100,00	54.973,08
Research & Development	77.494,95	84.455,61

Bron: (CBS Statline, 2021a, ECN, 2016).

Tabel 33 - CAO-ontwikkelingen ten behoeve van update arbeidsproductiviteit

CAO-ontwikkelingen: % ontwikkeling t.o.v. jaar eerder							
Sectoren	Bedrijfstak SBI	2015	2016	2017	2018	2019	2020
26 Elektrotechnische industrie	24-30, 33 Metalelektro	1,7%	1,8%	2,1%	2,1%	2,8%	5,0%
27 Elektrische apparatenindustrie	24-30, 33 Metalelektro	1,7%	1,8%	2,1%	2,1%	2,8%	5,0%
28 Machinebouw	24-30, 33 Metalelektro	1,7%	1,8%	2,1%	2,1%	2,8%	5,0%
29 Productie bussen/auto-aanhangwagenindustrie	24-30, 33 Metalelektro	1,7%	1,8%	2,1%	2,1%	2,8%	5,0%
33 Reparatie en installatie van machines	24-30, 33 Metalelektro	1,7%	1,8%	2,1%	2,1%	2,8%	5,0%
41 Algemene bouw en projectontwikkeling	F: Bouwnijverheid	1,2%	2,8%	1,7%	2,2%	2,6%	3,8%
43 Gespecialiseerde bouw	F: Bouwnijverheid	1,2%	2,8%	1,7%	2,2%	2,6%	3,8%
45 Onderhoud voertuigen/autohandel & reparatie	45 Autohandel & reparatie	0,4%	1,6%	1,7%	2,0%	2,2%	3,5%
Research & Development	A-U Alle economische activiteiten	1,4%	1,9%	1,4%	2,0%	2,5%	2,8%

Bron: (CBS Statline, 2021b).

Tabel 34 - Geschatte kosten gasafleverstation (50MWth)

Gasafleverstation	Aanschaf & plaatsing (euro)	Levensduur	Onderhoud/jaar
Gashoeveelheidsmeter (turbine meter typisch 8 bar of hoger)	30.000	25	0,067%
Regelstraat	15.000	25	0,033%
Behuizing	20.000	40	1-3%
Aansluitleiding	50-100.000/km	40	1%
Arbeid aansluitleiding	100-200.000/km	-	-
1 km per station aangenomen			

Op basis van (US DOE, 2002).

Tabel 35 - geschatte kosten industriële boilers en fornuizen

	Aanschaf (in miljoen euro)	Onderhoud/jaar (in miljoen euro)
Industriële boilers (50 MW)	2030: 6,3 (50% arbeid) 2040: 5,6 (50% arbeid) 2050: 5,3 (50% arbeid)	0,2 (95% arbeid)
Industriële fornuizen (50 MW)	2030: 3,7 (50% arbeid) 2040: 3,4 (50% arbeid) 2050: 3,1 (50% arbeid)	0,2 (95% arbeid)
Ombouw Industriële boilers en fornuizen (50 MW)	0,7 (50% arbeid)	
In 2020 uitsluitend ombouw, vanaf 2035 uitsluitend nieuwbouw. Lineair oplopend.		
Euro/fte	79.579	Gemiddelde van elektrotechnische industrie, reparatie en installatie van machines en gespecialiseerde bouw. Zie Tabel 32
Verhouding boilers/fornuizen	21,5%-78,5%	
Instructiedag voor bedieningsploeg van 3-4 personen niet inbegrepen		

Op basis van (EPA, 2010, TNO, 2020).

Tabel 36 - Aannames gebouwde omgeving

	2020	2030	2050 - laag	2050 - hoog	Bron
Aantal huishoudens	-	-	8,8 miljoen	8,8 miljoen	(Berenschot & Kalavasta, 2020)
PJ H ₂ huishoudens	0	0	0	41 PJ	Ibid.
% hybride WP	0	0	0	60%	Ibid.
Aantal hybride WP	0	0	0	5,28 miljoen	
Investerings WP	-	6.500	6.500	6.500	(CE Delft, 2017); gebaseerd op factsheets fabrikanten
PJ H ₂ in gebouwen	0	0	0	13 PJ	(Berenschot & Kalavasta, 2020)
% hybride WP	0	0	0	60%	ibid.
Aantal hybride WP	0	0	0	1,67 miljoen	
Totaal hybride WP	0	0	0	6,95 miljoen	

Algemene aannames:	
Alle waterstof voor de gebouwde omgeving is groen	
Geen hr-ketels op waterstof, enkel hybridewarmtepompen	
60% van gebouwen = 60% van energieverbruik van gebouwen	
60% van alle huishoudens in 2050 wil zeggen bijna 70% van de bestaande bouw	
De kosten van een hybridewarmtepomp zullen niet dalen, het rendement zal wel stijgen	
De verbruikte PJ H ₂ van het scenario, zijn de volledige H ₂ PJ in de gebouwde omgeving (i.e. reeds rekening gehouden met feit dat hybride WP voor slechts 1/3 van warmte levert, elektriciteit 2/3).	
Lineair oplopend vanaf 2030	
40,56 Arbeidsuren voor installatie hybridewarmtepomp (manuren)	EPA-maatregelen
Onderhoud WP is 1,5 uur per jaar	
Aandeel arbeid in onderhoud is 100%, materiaalkosten verwaarloosbaar	

Aanname		2018	2030	2050	Bron
TTW efficiency (kWh/100 km)	FC Cars (incl. taxis)	19,44	19,44	19,44	(JRC, 2020)
	FC LDV	49,5	49,5	49,5	(CE Delft, 2021, Oldenbroek et al., 2021)
	FC buses	243,09	243,09	229,78	(FCH JU, 2015)
	FC trucks	236,43	225,8	183	(FCH JU, 2020)
KM/year	FC passenger cars (incl. taxis, etc.)	22.000			
	FC LDV	35.000			
	FC buses	65.000			(FCH JU, 2015)
	FC trucks	100.000			(FCH JU, 2020)
Onderhoud (euro/km/jaar)	FC cars	0,023	0,023	0,023	
	FC LDV	0,24	0,055	0,055	
	FC trucks	0,5	0,115	0,115	
	FC buses	0,38	0,28	0,28	

Tabel 37 - Aannames voor waterstoftankstations

	2020	2030	2050
% 200 kg/d stations	80%	0%	0%
% 400 kg/d stations	20%	60%	20%
% 1t/d stations	0%	35%	50%
% 2t/d stations	0%	5%	30%
Aantal lichte voertuigen per station	2000	2000	2000
Aantal bussen per station	40	40	40
Aantal vrachtwagens per station	100	100	100
Levensduur	10	10	10
Capex (€) Equipment @ 200 kg/d	1.000.000	-	-
Capex Equipment @ 400 kg/d	1.200.000	600.000	400.000
Capex Equipment @ 1.000 kg/d	2.240.000	1.000.000	800.000
Capex Equipment @ 2.000 kg/d	3.360.000	1.500.000	1.200.000
Non-equipment costs	30%	30%	30%
O&M (%Capex/year)	8%	5%	2%
Fte/Equipment @ 200 kg/d	10% Capex		
Fte/Equipment @ 400 kg/d	8% Capex		
Fte/Equipment @ 1.000 kg/d	6% Capex		
Fte/Equipment @ 2.000 kg/d	5% Capex		