



H₂GROw – Op weg met waterstof in Groningen
Een maatschappelijke kosten-batenanalyse
van waterstof-elektrisch transport.

Hanzehogeschool Groningen
B. V. ter Veer

Voorwoord

De maatschappelijke kosten-batenanalyse in dit rapport is een onderdeel van het H2Grow-project waarvoor een waterstoftankstation, vier waterstof-elektrische vrachtwagens en acht waterstof-elektrische bestelbussen zijn ontwikkeld en gerealiseerd. Het project valt onder de DKTI-transport regeling die is bedoeld voor demonstratieprojecten op het gebied van klimaat technologieën en -innovaties in de transportsector.

Dit onderzoek neemt de gegevens van het H2Grow-project als uitgangspunt maar richt zich met name op de maatschappelijke kosten en baten van waterstof-elektrisch rijden indien dit zich verder ontwikkelt. Er wordt daarom veelal gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur om de toekomstige ontwikkeling in te schatten.

Graag wil ik bij deze de projectpartners bedanken voor de samenwerking. Het is indrukwekkend om te zien hoe deze partijen een voortrekkersrol vervullen op zoek naar meer duurzame manieren van transport. Verder wil ik mijn collega Leo Heijne bedanken voor het meedenken tijdens dit onderzoek en het leveren van nuttige feedback op de diverse concepten van dit rapport.

Groningen, 12-04-2023

Bart ter Veer

Samenvatting

Dit onderzoek betreft een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) van waterstof-elektrisch rijden. Het onderzoek is onderdeel van het H2Grow-project waarbij een volledig groene waterstofketen voor mobiliteit is gerealiseerd. De productie van waterstof vindt plaats te Zuidwending met behulp van een 1 MW PV-park en een 1 MW electrolyser. Binnen het H2Grow-project zijn een waterstofvulstation in Groningen en 4 waterstof-elektrische vrachtwagens en 8 waterstof-elektrische bestelbussen ontwikkeld en gerealiseerd.

Voor dit onderzoek zijn drie projectvarianten geanalyseerd. Voor de eerste variant wordt uitgegaan van de voertuigen van het project en productie van waterstof uitsluitend met elektriciteit afkomstig van het PV-park (beperkte vloot en uitsluitend PV). Bij de tweede variant wordt ook elektriciteit van het elektriciteitsnet gebruikt (beperkte vloot met PV en net). Bij de derde variant wordt uitgegaan van 38 vrachtwagens en 8 bestelbussen (uitgebreide vloot met PV en net). Tabel 1 toont de Levelised Cost Of Hydrogen (LCOH) zoals deze is verdeeld over de verschillende productiestappen bij de drie projectvarianten.

	Alleen PV Beperkte vloot	PV en net Beperkte vloot	PV en net Uitgebreide vloot
	Kosten in €/kg	Kosten in €/kg	Kosten in €/kg
Productie	€ 11,19	€ 5,05	€ 5,05
Compressie	€ 1,17	€ 0,33	€ 0,33
Transport	€ 1,99	€ 1,99	€ 1,04
Tankstation	€ 13,03	€ 13,03	€ 1,81
LCOH (€/kg)	€ 27,38	€ 20,40	€ 8,24

Tabel 1 De LCOH verdeeld over de productieketen bij drie verschillende projectvarianten.

Bij uitsluitend gebruik van PV is de conclusie dat de lage benutting van de electrolyser, de lage benutting van het tankstation en de behoefte aan waterstofopslag vanwege de seizoensverschillen leiden tot hoge productie- en distributiekosten per kilogram waterstof. De LCOH bedragen voor deze variant € 27,38 per kg.

Bij gebruik van PV en het elektriciteitsnet en een beperkte vloot dalen de productiekosten van waterstof omdat de electrolyser beter wordt benut en de behoefte aan opslag vermindert. De beperkte vloot veroorzaakt nog steeds een lage benutting van het tankstation en dus tot hoge kosten per kilogram. De LCOH bedragen nu € 20,40.

Bij gebruik van PV en het elektriciteitsnet en een uitgebreide vloot worden de electrolyser en het tankstation goed benut. De LCOH bedragen nu € 8,24. De eerste conclusie is dat bij de productie van waterstof het vanuit het kostenperspectief gunstig is om elektriciteit van het net af te nemen en niet uitsluitend een PV-park te gebruiken. Een tweede conclusie is dat de vaste kosten van een tankstation tot hoge kosten per kilogram waterstof leiden bij een lage bezetting. Dit zal bij een geleidelijke groei van het aantal waterstofvoertuigen de exploitatie van waterstoftankstations in de eerste fase bemoeilijken.

Bij gebruik van PV en het elektriciteitsnet is onderzocht of het mogelijk is om de kosten per kilogram waterstof te verlagen door op de duurste uren geen stroom in te kopen. Uit analyse blijkt dat het vermijden van de pieken in de stroomprijs inderdaad een zeer kleine invloed heeft op de gemiddelde kostprijs per kg waterstof. Door bijvoorbeeld een maximumprijs in te stellen van € 130 per MWh worden er enkele kilo's minder waterstof geproduceerd. De kostprijs per kg waterstof zakt een fractie, bij afronding op twee decimalen zou het verschil niet zichtbaar zijn. Door een lagere

maximumprijs per MWh te hanteren wordt er vaker geen stroom ingekocht. De totale productie daalt hierdoor en de kostprijs per kg waterstof begint te stijgen. De oorzaak is dat de vaste kosten over een kleiner volume moet worden verdeeld. De variabele kosten blijven dalen, deze bestaan voornamelijk uit de elektriciteitskosten dus goedkopere stroom resulteert in lagere variabele kosten. Het effect van de stijgende vaste kosten per kilogram is echter sterker.

De conclusie luidt dat het optimaliseren van het aantal operationele uren van de elektrolyser resulteert in de laagste kostprijs per kg waterstof. De elektrolyser beperkt inzetten wanneer de stroomprijzen laag zijn leidt niet tot lagere kosten per kg. Dit staat haaks op de visie dat de productie van waterstof vooral met overschotten van (zon- en wind)electriciteit moet worden gedaan. Door alleen overschotten te gebruiken zal het aantal operationele uren laag zijn en de kosten van de geproduceerde waterstof hoog.

Kosten		Baten	
CAPEX			
PV	€ 470.698	Vermeden brandstofkosten	€ 3.066.334
Electrolyser	€ 1.343.526	Vermeden CO2-uitstoot	€ 618.148
Vervanging stack	€ 685.468	Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 6.285.264
Compressor	€ 157.239	Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 425.319
Tube trailer	€ 177.603	Opbrengst waterstof	€ -16.226
Opslag	€ -	Onderhoud vrachtwagens	€ 3.756.268
Tankstation	€ 1.585.029	Onderhoud bestelbussen	€ 175.492
Vrachtwagens	€ 26.190.098	Werkgelegenheid	€ 4.898.000
Bestelbussen	€ 2.013.175		€ 19.208.598
	€ 32.622.835		
OPEX			
Elektriciteit voor productie H2	€ 3.672.347	Niet monetaire effecten	
Transportkosten netwerk	€ 493.088	Toegang zero-emissie zones	+ P.M.
Kosten GVO	€ 159.061	Vergunningsverlening	- P.M.
Compressie	€ 266.007	Veiligheids-maatregelen	- P.M.
transport	€ 575.696	Onderhoud	+/- P.M.
Chauffeur	€ 787.084	Gebruik schaarse materialen	- P.M.
Elektriciteit tankstation	€ 148.251	Belasting elektriciteitsnet	+/- P.M.
Onderhoud:		Ruimtebeslag	0 P.M.
PV	€ 61.926	Ontwikkeling	+ P.M.
Electrolyser	€ 657.624	waterstoftransportnet	
Compressor	€ 68.936		
Tube trailer	€ 32.881		
Tankstation	€ 975.476		
Vrachtwagens	€ 3.756.268		
Bestelbussen	€ 175.492		
	€ 11.830.137	NPV	€ 25.244.374
Totaal	€ 44.452.973	Totaal	€ 44.452.973

Tabel 2 MKBA bij gebruik van PV en elektriciteitsnet en een uitgebreide vloot inclusief niet monetaire effecten.

Tabel 2 toont de resultaten van de MKBA inclusief niet monetaire effecten bij gebruik van het PV-park en het elektriciteitsnet voor een uitgebreide vloot. De bedragen zijn de Net Present Value (NPV) van de kapitaalkosten en de operationele kosten over een periode van 15 jaar. Er is gerekend met een inflatie van 2% en een discontovoet van 6%. De netto contante waarde van het project is negatief hetgeen voornamelijk wordt veroorzaakt door de kosten van de voertuigen, de elektrolyser en de elektriciteitskosten.

De Total Cost of Ownership (TCO) voor een vrachtwagen bedragen € 73.415 per jaar. Dit omvat de kosten voor het voertuig, de brandstof, reparaties, onderhoud en banden. De Levelised Cost Of Driving (LCOD) bedragen € 2,33 per kilometer.

Uit de gevoeligheidsanalyse (Tabel 3) blijkt dat een sterke kostendaling van de waterstofvoertuigen en de elektrolyser alsmede een verbetering van de elektrolyser efficiency een sterk effect heeft op de resultaten. De mate waarin deze kostendaling kan worden gerealiseerd hangt naar verwachting sterk samen met de opschaling van de productie. Bij een daling van de genoemde factoren in lijn met de (optimistische) verwachting volgens de literatuur wordt een TCO van € 37.000 en een LCOD van € 1,18 mogelijk. De NPV van het project wordt aanzienlijk minder negatief en wordt geschat op - € 2,8 miljoen.

		Huidige kosten	Projectie met sterke kostendaling	Projectie met medium kostendaling
CAPEX	Vrachtwagen (€)	€ 437.525	€ 126.000	€ 250.000
	Bestelbus (€)	€ 142.000	€36.000	€80.000
	Electrolyser (€/kw)	€ 1.500	€ 800	€ 800
	Electrolyser efficiency (%)	60	67	67
NPV	Project 15 jaar (mln €)	-€ 25,2	- € 2,8	- € 10,9
TCO	Vrachtwagen (€/jr)	€ 73.415	€ 36.914	€ 49.937
	Bestelbus (€/jr)	€ 19.414	€ 7.701	€ 12.322
LCOD	Vrachtwagen (€/km)	€ 2,33	€ 1,17	€ 1,58
	Bestelbus (€/km)	€ 1,18	€ 0,47	€ 0,75

Tabel 3 TCO en LCOD bij de huidige en bij de geprojecteerde kosten van voertuigen en elektrolyser.

Tenslotte is er een vergelijking gemaakt tussen waterstof-elektrisch en batterij-elektrisch rijden. De kosten bij batterij-elektrisch rijden zijn lager dan bij waterstof-elektrisch rijden. Tabel 4 toont de TCO en de LCOD voor een batterij-elektrische en een waterstof-elektrische vrachtwagen bij de huidige kosten en bij de mogelijk toekomstig lagere kosten. De verwachting is dat de kosten van de voertuigen in de toekomst niet erg veel hoger zullen zijn dan de huidige dieselvrachtwagens. De hogere kosten van de waterstofvrachtwagen kan met name worden verklaard door de grotere elektriciteitsbehoefte.

		Huidige kosten	Projectie met sterke kostendaling	Projectie met medium kostendaling
TCO	Vrachtwagen H2 (€/jr)	€ 73.415	€ 36.914	€ 49.937
	Vrachtwagen batterij (€/j)	€ 52.544	€ 27.396	€ 38.554
LCOD	Vrachtwagen H2 (€/km)	€ 2,33	€ 1,17	€ 1,58
	Vrachtwagen batterij (€/km)	€ 1,66	€ 0,87	€ 1,22

Tabel 4 De TCO en LCOD voor een batterij-elektrische en een waterstof-elektrische vrachtwagen bij de huidige en de geprojecteerde kosten.

Behalve de TCO en de LCOD speelt ook de operationele inzetbaarheid een belangrijke rol. Voor langere afstanden en zwaarder transport biedt waterstof-elektrisch rijden meer mogelijkheden dan batterij-elektrisch rijden. Er kunnen op basis van het bereik en de laadtijd drie verschillende situaties worden onderscheiden. Indien het bereik van de vrachtwagen niet groter hoeft te zijn dan 525 kilometer dan zijn bereik en oplaadtijd geen beperkende factor in de keuze. De batterij elektrische en de waterstof-elektrische vrachtwagen voldoen beide aan de gestelde eisen. Indien het bereik van de vrachtwagen niet groter hoeft te zijn dan 670 kilometer dan kan de batterij-elektrische vrachtwagen dit realiseren indien de batterij tijdens de chauffeurspauze wordt bijgeladen. Overigens zullen de kilometrages in de praktijk lager zijn omdat de batterij niet volledig leeg zal worden gereden. Indien

het bereik van de vrachtwagen groter moet zijn dan 670 kilometer kan de batterij-elektrische vrachtwagen volgens de eerder gestelde specificaties daar niet aan voldoen. Voor langere afstanden is de waterstof-elektrische vrachtwagen daarom meer geschikt. Het bereik is groter en de vrachtwagen kan in 15 minuten worden getankt. Uiteraard moet daarvoor wel de infrastructuur aanwezig zijn.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
1. Inleiding	8
2. Methodologie	9
3. Probleemanalyse	11
4. Vaststellen nulalternatief	13
5. Vaststellen projectalternatief.....	17
6. Bepalen kosten	19
7. Effecten	25
8. Maatschappelijke Kostenbatenanalyse.....	33
9. Gevoeligheidsanalyse	41
10. Niet-kwantificeerbare kosten en baten	47
11. Effecten op macroniveau	53
12. De vergelijking met batterij elektrische vrachtwagens.....	63
13. Discussie en conclusies.....	75
Referenties	79

1. Inleiding

In 2015 heeft Nederland ingestemd met het VN-klimaatakkoord van Parijs (1) en Glasgow (2). Om de klimaatdoelstellingen van dit akkoord voor Nederland te realiseren is het klimaatakkoord opgesteld (3). Het klimaatakkoord maakt voor het behalen van de doelstellingen en het te voeren beleid een onderverdeling in de sectoren gebouwde omgeving, mobiliteit, industrie, landbouw en elektriciteit. Waterstof wordt in meerdere sectoren genoemd als een onderdeel van de benodigde energietransitie. In het klimaatakkoord wordt 500 MW elektrolysevermogen in 2025 en 3 à 4 GW in 2030 als doelstelling genoemd. In de kabinetsvisie waterstof werkt het kabinet de doelstellingen en het beleid op het gebied van waterstof verder uit (4). Voor wat betreft waterstof in de transportsector noemt de kabinetsvisie als ambitie voor 2025 de realisatie van 50 tankstations, 15.000 brandstofcelauto's en 3000 zware voertuigen. Het Nationaal Waterstof Programma (NWP) heeft als taak om bij te dragen aan de realisatie van de doelstellingen van het klimaatakkoord en de kabinetsvisie waterstof¹. De realisatie is een taak voor alle stakeholders die zijn verenigd in de cross-sectorale werkgroep waterstof (CSWW).

Om de doelstellingen op het gebied van waterstof en mobiliteit te realiseren zijn demonstratieprojecten noodzakelijk. De regeling Demonstratie Klimaattechnologieën en -innovaties in transport (DKTI-transport) ondersteunt projecten voor duurzaam vervoer². Het H2GROW project is een DKTI-transport project met als doelstelling het demonstreren en valideren van een leveringsketen van hernieuwbare waterstof. Onder de leveringsketen wordt hier verstaan de keten van productie, opslag, distributie tot en met het gebruik van waterstof in goederen- en personenvervoer. De productie van waterstof voor dit project zal plaatsvinden te Zuidwending. De Gasunie heeft op deze locatie zonnepanelen met een capaciteit van 1 MW en een electrolyser met dezelfde capaciteit. De waterstof zal via de weg worden getransporteerd naar een in het kader van dit project aangelegd tankstation te Groningen. De gemeente Groningen, de Gasunie en Century hebben in totaal 8 bestelbussen en 4 vuilniswagens besteld. Deze voertuigen zijn binnen dit project omgebouwd tot waterstof-elektrische voertuigen.

In dit onderzoek wordt een maatschappelijke kosten-batenanalyse gemaakt over waterstof-elektrisch rijden. Voor zover mogelijk zullen alle kosten en baten besproken worden, ook degene die niet kwantitatief of monetair van aard zijn. De gehanteerde methode is gebaseerd op de Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse (5), dit zal in het hoofdstuk over methodologie nader worden toegelicht.

¹ <https://nationaalwaterstofprogramma.nl/over+ons/default.aspx>

² <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/dkti-transport#-achtergrond>

2. Methodologie

Deze maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) (5) beoordeelt de toegevoegde waarde van een leveringsketen van hernieuwbare waterstof voor de mobiliteitssector. Een MKBA omvat alle effecten van een project: kwantitatief en kwalitatief, monetair en niet-monetair. Het is mogelijk dat de toegevoegde waarde van de leveringsketen positief is maar dat voor individuele stakeholders de kosten hoger zijn dan de baten. Daarom wordt ook de verdeling van kosten en baten over de verschillende stakeholders onderzocht.

De MKBA bestaat uit de volgende - in de komende hoofdstukken te bespreken- onderdelen:

1. Probleemanalyse.
Waterstof-elektrisch rijden kan bijdragen aan de totstandkoming van een zero-emissie transportsysteem. Er is behoefte aan ervaring en kennis betreffende het realiseren van een leveringsketen van hernieuwbare waterstof.
2. Vaststellen nulalternatief.
Het nulalternatief betreft de voortzetting van het huidige beleid. Wat is de verwachte ontwikkeling van de transportsector zonder de verdere ontwikkeling van waterstof-elektrisch rijden?
3. Vaststellen projectalternatief.
Op basis van het gerealiseerde demonstratieproject is kennis en ervaring opgedaan betreffende de kosten en baten van een leveringsketen van hernieuwbare waterstof en van de mogelijke plaats van waterstof-elektrisch rijden in het toekomstige transportsysteem.
4. Bepalen kosten.
De kosten van het project zijn geïnventariseerd. Het gaat daarbij om de investeringen en om de operationele- en onderhoudskosten van het project. Ook de juridische procedures zijn onderdeel van de projectkosten. Tevens is onderzocht wat de te verwachten ontwikkeling van de kosten is bij een grootschalige en generieke toepassing.
5. Identificeren van effecten.
Alle positieve en negatieve effecten van het project zijn in kaart gebracht. De effecten zijn direct en indirect, kwantitatief en kwalitatief. Voorbeelden van positieve, directe effecten zijn het ontstaan van waterstof-elektrisch transport, het ontwikkelen van kennis en ervaring en het integreren van de elektriciteits-, gas- en transportsector. Voorbeelden van negatieve, directe effecten zijn eventuele weerstand van omwonenden en gebruikers (onder te verdelen in psychologische, socio-demografische en ruimtelijke variabelen³), en efficiencyverliezen ten opzichte van het nulalternatief. Bij het identificeren van effecten wordt ook het optreden van verdelingseffecten tussen de partners in de keten onderzocht.
6. Kwantificeren van effecten.
Daar waar mogelijk zijn de effecten gekwantificeerd. Het gaat daarbij bijvoorbeeld om hoeveel elektriciteit wordt gebruikt om waterstof te produceren en om hoeveel kilometers er met deze waterstof wordt gereden. Sommige effecten kunnen moeilijk of niet worden gekwantificeerd.

³ Huijts, N.M.A. en B. van Wee, *The evaluation of hydrogen fuel stations by citizens*, Hydrogen energy 40 (2015).

Systeemintegratie, kennisontwikkeling en weerstand zijn niet kwantitatief van aard. Deze effecten zijn kwalitatief omschreven en blijven onderdeel van de MKBA.

7. Monetariseren van effecten.

Daar waar mogelijk zijn de effecten gemonetariseerd. De kosten van bijvoorbeeld de elektriciteit en de waarde van de gereden kilometers hangen af van het gekozen prijspeil. Er is bij deze keuze gebruik gemaakt van kengetallen en scenario's.

8. Opstellen overzicht van kosten en baten.

Met behulp van een discontovoet is de contante waarde berekend van de gemonetariseerde effecten. De niet-monetaire effecten blijven onderdeel van de MKBA. Een positieve of negatieve netto contante waarde van het project moet dus worden beoordeeld met inachtneming van de overige effecten.

9. Gevoeligheidsanalyse.

Bij het vaststellen, kwantificeren en monetariseren van effecten is gebruik gemaakt van aannames en veronderstellingen. Er is daarom bij een MKBA altijd sprake van onzekerheden. In de gevoeligheidsanalyse is onderzocht welke impact een wijziging in de aannames heeft op de uitkomsten van de MKBA.

Generaliseerbaarheid van de uitkomsten.

De MKBA richt zich op de toegevoegde waarde van het demonstratieproject. Uiteraard zullen de kosten en baten van een demonstratieproject afwijken van de kosten en baten van een leveringsketen van hernieuwbare waterstof op grotere schaal en bij herhaalde toepassing. In het onderzoek is daarom met name onderzocht wat de toegevoegde waarde van een dergelijke leveringsketen kan zijn indien er rekening wordt gehouden met leereffecten en schaalvoordelen.

Bij het opstellen van de MKBA is uitgegaan van optimalisatie over de keten. Hierbij valt te denken aan de schaalgrootte van de productie-installaties, het transport en de opslag. Minder transportbewegingen kunnen bijvoorbeeld leiden tot hogere opslagkosten. Een kleinere elektrolysercapaciteit met meer operationele uren kan aanleiding geven voor meer transportbewegingen.

Onderzoeksmethoden.

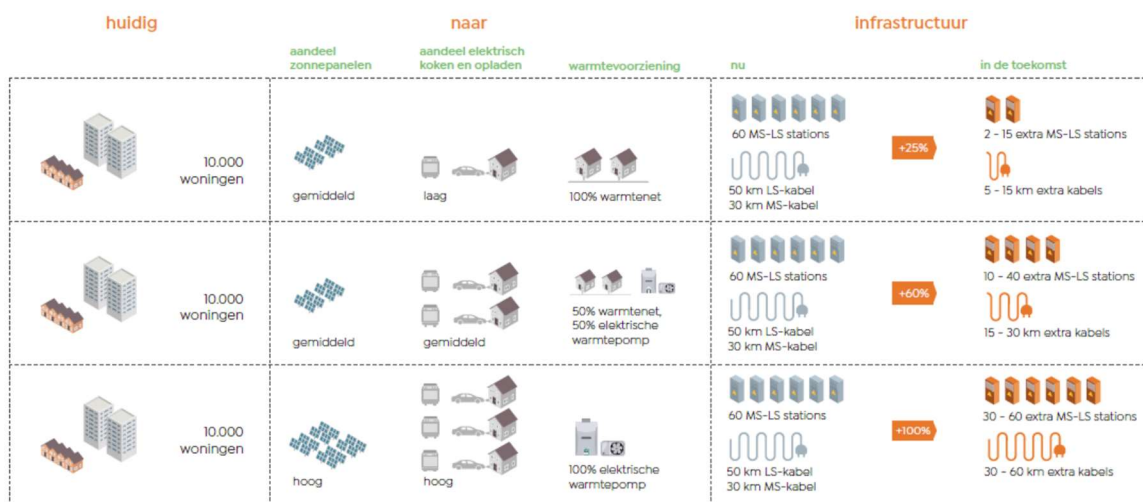
Voor het opstellen van de MKBA is gebruik gemaakt van verschillende onderzoeksmethoden. Interviews met projectpartners en experts hebben inzicht geboden in de kosten en baten van het project. Enquêtes en/of interviews zijn een instrument om eventuele weerstand bij gebruikers en bewoners in kaart te brengen. Literatuurstudie en kengetallen zullen worden gebruikt om de bevindingen te toetsen. Scenario's zijn ingezet om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren.

3. Probleemanalyse

De eerste fase van een MKBA is de probleemanalyse. Er moet worden vastgesteld wat het knelpunt is of welke kans onbenut dreigt te worden. Daarbij gaat het niet alleen om de omvang van het probleem op dit moment maar ook om de verwachte ontwikkeling bij ongewijzigd beleid.

Gegeven de doelstellingen op het gebied van klimaatbeleid zoals deze op internationaal (1) (6) en nationaal (3) niveau zijn gesteld, is het noodzakelijk om in de mobiliteitssector de uitstoot van CO₂ en andere gassen sterk te verminderen. De doelstelling volgens het klimaatakkoord is een CO₂ uitstoot van 25 Mton door de mobiliteitssector in 2030 hetgeen een daling van 7,3 Mton betekent ten opzichte van 2018 (3). Waterstof wordt in het klimaatakkoord genoemd als mogelijke energiedrager in het transport. Centraal in de probleemanalyse staat dus de gewenste reductie van de CO₂ uitstoot in de mobiliteitssector.

Een belangrijke ontwikkeling op het gebied van CO₂ uitstoot en mobiliteit is het elektrisch rijden. Er is sprake van een sterke stijging van het aantal batterij elektrische voertuigen. Het opladen van deze voertuigen zal tot een steeds grotere belasting van het elektriciteitsnetwerk leiden. Het netwerk zal moeten worden verzaamd zowel in de wijken voor het faciliteren van laadpalen als bij de stations waar snelladers worden geplaatst. Uiteindelijk zal dit ook effect hebben op de capaciteit van het middenspanningsnet. Figuur 1 maakt duidelijk dat elektrisch rijden in combinatie met elektrisch verwarmen en koken om grote investeringen in het netwerk zal vragen.



Figuur 1 Indicatie van de impact van elektrificatie op het elektriciteitsnet. (7)

Een tweede onderdeel van de probleemanalyse is dus dat de huidige ontwikkeling van elektrisch rijden leidt tot hoge belasting van het netwerk en investeringen noodzakelijk maakt.

De batterij elektrische voertuigen zijn nog in ontwikkeling. De kosten zullen verder dalen en de technologie zal nog verbeteren. Op dit moment zijn batterij elektrische voertuigen nog beperkt in het bereik dat met een volle batterij kan worden afgelegd. Voor zwaardere voertuigen geldt dit nog sterker. Het derde onderdeel van de probleemanalyse is dus dat er voor zwaardere voertuigen en langere afstanden nog geen goed alternatief is voor de huidige diesel- en benzine voertuigen.

Op lokaal niveau heeft de gemeente Groningen de doelstelling om in 2035 CO2 neutraal te zijn (8). Afgeleide doelstellingen zijn het volledig emissieloos zijn van de bevoorrading van de binnenstad in 2025, emissieloos doelgroepenvervoer in 2023 en emissieloos busvervoer in 2030. Deze laatste afgeleide doelstelling komt overeen met het landelijk gesloten bestuursakkoord Zero emissie regionaal openbaar vervoer per bus (9). Het vierde onderdeel van de probleemanalyse is dus de gewenste realisatie van emissieloos busvervoer per 2030 conform het huidige beleid.

Probleemanalyse:

In de mobiliteitssector moet voor 2030 een reductie van 7,3 Mton CO2 uitstoot worden gerealiseerd. De ontwikkeling naar elektrisch rijden die is ingezet zal in de toekomst leiden tot een hoge belasting van het netwerk en investeringen noodzakelijk maken. Voor langere afstanden en zwaar transport is batterij elektrisch rijden mogelijk niet geschikt. Het busvervoer in Nederland moet in 2030 emissievrij zijn.

4. Vaststellen nulalternatief.

Het nulalternatief is de meest waarschijnlijk te achten ontwikkeling die zal plaatsvinden op alle voor de MKBA relevante markten in het geval de te beoordelen maatregel niet wordt uitgevoerd (5). Voor dit onderzoek gaat het daarbij dus om de ontwikkeling van de mobiliteitssector in Nederland indien er geen gebruik gaat worden gemaakt van waterstof. De vraag hoe de mobiliteitsmarkt zich gaat ontwikkelen is lastig te beantwoorden vanwege de transitie die momenteel plaatsvindt. De ontwikkeling van batterij elektrische voertuigen (BEV) en Plug-in Hybride elektrische voertuigen (PHEV) zal daarom besproken worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen personenauto's, bestelbussen, OV bussen en vrachtwagens. Tabel 5 geeft een overzicht van het totaal aantal voertuigen per categorie en van het aandeel elektrische auto's daarin. Om tot betrouwbare gegevens te komen is van diverse bronnen gebruik gemaakt. Voor de jaren 2015 en 2019 is gebruik gemaakt van gegevens van het CBS⁴ en het RVO⁵. Het CPB geeft voor het totaal aantal personenauto's in 2030 een schatting met een hoog en een laag scenario. Deze groeifactoren zijn ook gebruikt voor het schatten van het totaal aantal voertuigen in de andere categorieën. Voor de verwachte toekomstige ontwikkeling van het aantal elektrische voertuigen zijn de scenario's geraadpleegd van het Energieakkoord (Carbontax model), TNO, Elaad, CPB en het RVO.

	2015	2021	2030
Personenauto's			
Totaal	7.979.083	8.793.592	8.162.000 tot 9.086.000
Elektrisch	44.170	381.815	Laag: 100.000- 700.000 Hoog: 1,2 – 1,7 miljoen
Bestelbussen			
Totaal	814.954	960.130	875.000 tot 974.000
Elektrisch	1.460	6.200	200.000
Bussen (alle)			
Totaal	9.597	9.154	-
Elektrisch	105	1.356	-
Bussen (alleen OV)			
Totaal	6.212	4.704 ⁶	5.007 tot 5574
Elektrisch	94	706	5.007 tot 5574
Vrachtwagens			
Totaal	133.889	143.670	137.000 tot 152.000
Elektrisch	50	220	8400

Tabel 5 Totaal aantal en het aantal elektrisch aangedreven voertuigen per categorie (10) (11) (12) (13) (14) (15).

Personenauto's

⁴ <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82044NED/table?ts=1559045432348>

⁵ <https://nederlandelektrisch.nl/actueel/verkoopcijfers>

⁶ <https://www.crow.nl/downloads/pdf/collectief-vervoer/transitie-naar-zero-emissiebusen-in-nederland.aspx?ext=>. Gegevens afgeleid van pagina 7.

Relatief gezien is het aandeel van de batterij elektrische auto in het totaal aantal geregistreerde personenauto's nog laag (4,3 %) maar er is sprake van een sterke groei (Tabel 5). De netbeheerders doen via het samenwerkingsverband Elaad onderzoek naar de ontwikkeling van elektrisch rijden in Nederland. Bij het middelste van drie scenario's wordt het aantal BEV personenauto's in 2030 geschat op circa 2,3 miljoen voertuigen (16). De belangrijkste factoren die deze ontwikkeling beïnvloeden zijn de ontwikkeling van de accuprijs, het gedrag van consumenten en het gedrag van producenten. De Nationale Agenda Laadinfrastructuur gaat voor 2030 uit van een wagenpark van 1,9 miljoen elektrische voertuigen (17). Deze verwachting is gebaseerd op de uitvoering van het klimaatakkoord.

Gebruik

Personenauto's in Nederland worden voor diverse doeleinden gebruikt. Uiteraard kunnen gebruikersprofielen sterk verschillen van het gemiddelde. In het rapport Transport en mobiliteit rapporteert het CBS (18) de volgende Nederlandse gemiddelden betreffende het gebruik van de auto.

- Per jaar reist de Nederlander gemiddeld 8.000 kilometer in Nederland per auto.
- De voornaamste reismotieven zijn woon-werkverkeer, sociaal/recreatief, bezoek en winkelen.
- Er zijn 10 miljoen woon-werkverplaatsingen op een doordeweekse dag.
- De gemiddelde woonwerkreis is 24 kilometer retour.
- 77% van de woonwerkreizen wordt afgelegd per auto.

Drempels

De belangrijkste redenen waarom consumenten nog geen elektrische auto aanschaffen zijn volgens een consumentenonderzoek van de ANWB (19):

- De aanschafwaarde van een elektrische auto is te hoog. Deze auto's kosten minimaal € 20.000 terwijl een grote groep maximaal € 10.000 wil besteden aan een volgende auto.
- De actieradius is momenteel gemiddeld 333 kilometer. Deze wordt door de consument nog als onvoldoende beoordeeld.
- Er zijn te weinig openbare laadpunten.

Bestelbussen

Per 1 januari 2021 waren er in totaal 960.130 bestelbussen lichter dan 3,5 ton in Nederland geregistreerd. Uit Tabel 5 blijkt dat het totaal aantal geregistreerde BEV bestelbussen klein is ten opzichte van het totaal. Van het totaal aantal bestelbussen was op 1 januari 2021 dus 0,65 % batterij elektrisch aangedreven (20).

Gebruik

Uit onderzoek van TNO en CE Delft naar de elektrificatie van het bestelbusverkeer in Nederland kunnen onder andere de volgende conclusies worden getrokken (11):

- Circa 75% van de kilometers in de stedelijke logistiek worden met bestelbussen gereden;
- Bestelauto's zijn daarmee verantwoordelijk voor circa 50% van de CO2 uitstoot binnen de stedelijke logistiek;
- In het scenario dat uitgaat van een hoge groei zijn er in 2030 200.000 BEV bestelbussen geregistreerd in Nederland.

Voor wat betreft het gebruikersprofiel blijkt uit het onderzoek van TNO en CE Delft dat:

- Voor het gemiddelde dag-kilometrage volstaat een actieradius van 175 km voor circa 85% van de bestelbusgebruikers;
- Het gebruikersprofiel verschilt per sector. In de bouwsector is er overdag vaak voldoende tijd om het voertuig op te laden. In de pakketbezorging is het kilometrage hoger en is er overdag weinig gelegenheid om op te laden.

Drempels

De belangrijkste oorzaken van het geringe huidige aantal BEV bestelbussen en de relatief langzame groei zijn volgens hetzelfde onderzoek:

- Hogere aanschafkosten. De prijs van een BEV bestelbus is gemiddeld ruim €12.000 hoger dan die van een diesel bestelbus;
- Snellere waardevermindering. De tweedehands markt voor elektrische bestelbussen is nog beperkt. De restwaarde van een BEV bestelbus is in de huidige situatie circa 10 procentpunten lager dan die van een diesel bestelbus;
- Kleinere bereik. De actieradius van een BEV bestelbus ligt momenteel tussen de 150 en 200 km.

Bussen

Uit Tabel 5 blijkt dat er in totaal 4.704 OV-bussen in Nederland staan geregistreerd. 706 daarvan zijn elektrisch aangedreven hetgeen neerkomt op een aandeel van 15% Het grootste gedeelte van de huidige OV-bussen rijdt op diesel.

Volgens de Wet personenvervoer 2000 artikel 20 lid 2 zijn gedeputeerde staten het bevoegde orgaan tot het verlenen van een concessie voor het openbaar vervoer per bus. Per 1 januari 2018 zijn er in Nederland de volgende regionale concessieverleners (21):

- 12 provincies (De provincies Groningen en Drenthe werken samen in het OV-Bureau GD)
- Metropoolregio Rotterdam-Den Haag
- Vervoersregio Amsterdam.

De twee grootste bedrijven, Connexxion en Arriva, beschikken samen over bijna 60% van het totale wagenpark aan OV-bussen, gevolgd door Qbuzz en Keolis met ieder ongeveer 13%. EBS, HTM, GVB, RET hebben samen ruim 16% van het aantal OV-bussen in handen (21).

Zoals in de probleemanalyse is besproken hebben de vervoerders afgesproken in het bestuursakkoord Zero emissie regionaal openbaar vervoer per bus dat in 2030 alle OV-bussen emissievrij rijden. Genoemde partijen zullen dus in de komende periode hun huidige bussen gaan vervangen door een elektrisch alternatief.

Gebruik

Het OV-Bureau van Groningen en Drenthe heeft in de concessie voor de periode 2020 – 2029 opgenomen dat er 20 waterstofbussen zullen worden ingezet met bouwjaar 2019 of 2020. Inmiddels heeft Qbuzz 32 waterstofbussen in Groningen en Drenthe⁷. De bussen rijden tenminste 60.000 dienstregelingskilometers per jaar. De waterstof wordt geleverd door Shell, er zijn waterstofvulpunten aan de Peizerweg in Groningen en op het GZI-terrein in Emmen. De

⁷ <https://www.qbuzz.nl/nieuws/YrYUHHYAACcAE3RJ/volgende-stap-in-waterstofeconomie-dankzij-openbaar-vervoer>

concessiehouder zal tenminste 110 en maximaal 160 ton waterstof afnemen per jaar tegen de garantieprij van € 3,50 per kg (22).

De specificaties van het vulstation aan de Peizerweg volgens de concessie zijn (23):

- De hoeveelheid te leveren waterstof per jaar bedraagt 110 – 160 ton.
- De hoeveelheid te leveren waterstof per dag bedraagt 400 – 600 kg.
- Het waterstofvulstation dient een capaciteit te hebben van ten minste 250 kg waterstof per uur, tot maximaal 500 kg waterstof achter elkaar.
- Het waterstofvulstation dient 2 vulpunten met een druk van 350 bar te hebben.

Uit gesprekken met Qbuzz, de concessiehouder voor Groningen en Drenthe, blijkt dat zij in de toekomst verwachten een voertuigenpark te hebben bestaande uit een combinatie van batterij- en waterstofbussen. De batterijbussen zullen worden ingezet op de kortere trajecten en een kleine 300 kilometer per dag rijden. Een deel van deze bussen zal ook overdag worden bijgeladen (opportunity charging), het andere deel zal alleen 's nachts worden opgeladen. Voor langere trajecten verwacht Qbuzz waterstofbussen te gaan gebruiken.

Vervoerder Hermes rijdt in de regio Eindhoven sinds 2017 met 43 elektrische bussen.⁸ Hermes zet geen waterstofbussen in maar gebruikt extra elektrische bussen zodat er gedurende de dag kan worden opgeladen. De meeste lijndiensten van Hermes rijden een kleine 300 kilometer per dag. Na 1 tot 4 ritten, afhankelijk van de lengte van de rit, moet een bus worden opgeladen. Op 33 rijdende bussen zijn 7 bussen uit de roulatie om op te laden. Vanaf december 2022 worden er 32 nieuwe elektrische bussen aan de vloot toegevoegd⁹.

Drempels

Alle OV-bussen zullen in 2030 volgens het huidige beleid emissievrij rijden. Er wordt momenteel vaker gekozen voor batterijbussen dan voor waterstofbussen. Waterstofbussen zijn duurder in aanschaf (volgens Qbuzz € 600.000 voor een waterstofbus en € 400.000 voor een batterijbus), er zijn weinig waterstofvulpunten en waterstof is relatief duur.

Nulalternatief.

De personenauto's en bestelbussen rijden momenteel voornamelijk op benzine en diesel. Het aandeel batterij elektrische voertuigen is nog klein maar groeit snel. Toch is de verwachting dat ook in 2030 nog circa 80% van de voertuigen op benzine of diesel zal rijden. De elektrische voertuigen zullen naar verwachting gebruik maken van batterijtechnologie.

OV-bussen zullen in 2030 emissievrij rijden. Dit zal worden gerealiseerd met een mix van batterij- en waterstofbussen. OV-vervoerders doen op dit moment ervaring op met beide typen voertuigen.

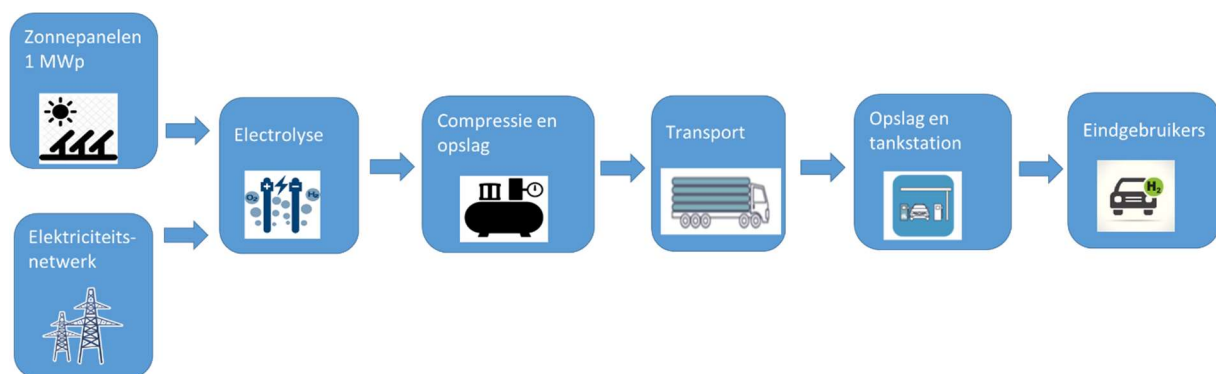
⁸ <https://www.ovmagazine.nl/2017/03/eindhovense-e-bussen-maken-belofte-waar-1652/>

⁹ <https://www.hermes.nl/nl/nieuws/hermes-gaat-met-nieuwe-elektrische-bussen-rijden-in-zuidoost-brabant>

5. Vaststellen projectalternatief.

Een mogelijk alternatief voor het batterij elektrische voertuig is het gebruiken van waterstof als energiedrager. Waterstof is een gas dat onder andere geproduceerd kan worden door middel van elektrolyse. Dit proces gebruikt elektriciteit om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Een voertuig kan rijden op waterstof indien het voertuig is uitgerust met een brandstofcel. De brandstofcel produceert elektriciteit door met waterstof en zuurstof weer water te produceren. Dit is dus in feite het omgekeerde proces van elektrolyse.

Het H2GROw project heeft als doelstelling het demonstreren en valideren van een leveringsketen van hernieuwbare waterstof. Onder de leveringsketen wordt hier verstaan de keten van productie, opslag, distributie tot en met het gebruik van waterstof in goederen- en personenvervoer (Figuur 2)



Figuur 2 H2GROw Leveringsketen van hernieuwbare waterstof.

De stappen in de leveringsketen zullen nu worden besproken. In eerste instantie zal worden uitgegaan van de configuratie die overeenkomt met de opzet van het project.

Gasunie New Energy heeft in Zuidwending het project HyStock ontwikkeld. Dit project gebruikt elektriciteit van zonnepanelen en van het elektriciteitsnetwerk om een 1 MW elektrolyser van energie te voorzien. De elektrolyser produceert waterstof die vervolgens wordt opgeslagen in een lage druk (20 bar) buffertank. Middels een compressor in een container wordt de druk verhoogd naar 300 bar. Met het gecompriëerde gas wordt een tubetrailer gevuld. Er zijn twee laadpunten voor de tubetrailers terwijl slechts één tube tegelijk kan worden gevuld (24).

De productie van waterstof voor dit project vindt plaats te Zuidwending. De Gasunie heeft op deze locatie zonnepanelen met een capaciteit van 1 MW en een elektrolyser met dezelfde capaciteit. De waterstof wordt via de weg getransporteerd naar een in het kader van dit project aan de Bornholmstraat te Groningen gerealiseerd tankstation. De gemeente Groningen, de Gasunie en Century hebben in totaal 8 bestelbussen en 4 vuilniswagens besteld. Deze voertuigen zijn binnen dit project omgebouwd tot waterstof-elektrische voertuigen.

In deze studie is een kostenbatenanalyse opgesteld van deze leveringsketen. Belangrijke doelstellingen van het H2GROw project zijn het realiseren van een proof of concept, het opdoen van ervaring en het genereren van kennis. De schaal waarop het project wordt uitgevoerd zal vanuit economisch perspectief niet leiden tot optimale resultaten. De kostenbatenanalyse zal zich daarom

met name richten op de vraag welke aanpassingen in de leveringsketen kunnen leiden tot een positievere uitkomst van de kostenbatenanalyse.

6. Bepalen kosten.

Voor het bepalen van de kosten van de leveringsketen van hernieuwbare waterstof worden in eerste instantie de investeringen besproken die noodzakelijk zijn voor de realisatie van de leveringsketen. Op basis van meerdere bronnen is onderzocht wat bij de huidige stand van zaken de kosten van de benodigde productiemiddelen zijn en van welke kenmerken moet worden uitgegaan.

Zonnepanelen

Zonnepanelen	
Kosten PV laag (€/kWp)	540
Kosten PV hoog (€/kWp)	590
Omvormer vervanging (€/kWp)	27
O&M (% CAPEX)	1
Vaste O&M kosten (€/kWp per jaar)	11,8
Variabele O&M kosten (€/kWh)	0,0019
Capaciteit (MW)	1
Utilisation factor	1
CAPEX	€ 565.000
Levensduur (jaar)	25
Q to W/m2 multiplier	2,777777778

Tabel 6 Basisgegevens zonnepanelen. (25) (26) (27)

Op de locatie te Zuidwending heeft Gasunie New Energy zonnepanelen met een totale capaciteit van 1 MW beschikbaar voor de productie van waterstof. De kosten van zonnepanelen worden meestal uitgedrukt in kosten per kilowatt vermogen. Voor Nederland publiceert ECN rapportages betreffende de kosten en kenmerken van diverse energie productietechnologieën. Voor PV-projecten tot een schaal van 1 MWp worden de kosten geschat op € 590 per kW piekvermogen. Voor projecten op een schaal groter dan 1 MWp daalt dit tot € 540 (27). Een project van 1MWp zal hier waarschijnlijk tussenin zitten. Voor dit onderzoek wordt uitgegaan van € 565 per kW piekvermogen.

O&M kosten worden door sommige bronnen uitgedrukt als percentage van de CAPEX. Voor de SDE++ regeling wordt onderscheid gemaakt tussen vaste en variabele O&M kosten. In het basismodel wordt in dit onderzoek uitgegaan van O&M kosten ter hoogte van 1% van de CAPEX kosten.

Voor de levensduur van zonnepanelen wordt uitgegaan van 25 jaar. Fabrikanten geven 25 jaar garantie dus de markt lijkt hiermee in te stemmen. Omdat voor het project wordt uitgegaan van een levensduur van 15 jaar hoeft niet de hele investering gedurende de projectperiode te worden terugverdiend. De restwaarde is bepaald op basis van lineaire afschrijving gedurende 15 jaar.

Om de elektriciteitsproductie van de zonnepanelen te schatten worden de utilisation factor en de Q to W/m2 multiplier gebruikt. Deze parameters zullen nader worden gesproken bij het bepalen van de effecten van het project.

Elektrolyzers

Elektrolyser	PEM
kosten electrolyser (€/kw)	1.500
Capaciteit electrolyser (MW)	1
CAPEX	€ 1.500.000
Levensduur (jaar)	20
Efficiency electrolyser (%)	60
Conversie MWh naar H2 kg	30,003
Operationele uren (uitsluitend PV)	4.268
Operationele uren (PV + netwerk)	8.000
Druk (bar)	30
O&M (% van Capex)	4
Vervanging PEM stack (% van capex)	35
Levensduur PEM stack (uren)	40.000
Levensduur PEM stack (jaren)	9

Tabel 7 Basisgegevens electrolyzers. (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39)

De kosten van electrolyzers (zowel Alkaline als PEM) zijn aan het dalen vanwege de groeiende productie en het grotere vermogen van de electrolyzers. Het raadplegen van meerdere bronnen leert dat de genoemde kosten per kW vermogen voor een electrolyser variëren van € 516/kW tot € 3.300/kW hetgeen een grote range is. € 1.500/kW is een bedrag dat in meerdere onderzoeken wordt genoemd. Ook Hydrogenics, een grote producent van electrolyzers, geeft aan dat een PEM electrolyser van 1 MW ongeveer € 1.500/kW kost.

De levensduur van een electrolyser wordt meestal gesteld op 20 jaar. De zogeheten cell stack is het onderdeel van een electrolyser dat voor het einde van de levensduur moet worden vervangen tegen relatief hoge kosten. Afhankelijk van het gebruik zal dit neerkomen op vervanging na 40.000 operationele uren of na 9 jaar. De vervanging van de cell stack is ongeveer gelijk aan 35 procent van de gedane investering voor de electrolyser.

Onder de efficiency van een electrolyser wordt verstaan hoeveel procent van de gebruikte elektriciteit door de elektrolyser wordt omgezet naar de energiedrager waterstof. Deze efficiency wordt door de meeste bronnen geschat op 60 procent. De efficiency kan ook worden uitgedrukt in het aantal kWh dat nodig is voor de productie van een normaal kubieke meter waterstof.

Indien de electrolyser uitsluitend opereert op elektriciteit van de zonnepanelen dan beperkt dit de operationele uren. De electrolyser zal dan alleen waterstof produceren tijdens circa 4.268 uren dat het licht is. De volledige capaciteit zal alleen worden benut tijdens zeer zonnige uren. Om de capaciteit van de electrolyser beter te benutten kan er aanvullend stroom van het net worden gebruikt. In dat geval wordt verondersteld dat er 8.000 operationele uren per jaar kunnen worden gerealiseerd.

Compressoren

Compressor	
CAPEX medium	€ 157.000
Levensduur (jaren)	15
Pressure (bar in-bar out)	30-300
Capacity (kg/h)	18
Electricity consumption (% of HHV)- medium	10
O&M (% van Capex)	4

Tabel 8 Basisgegevens compressoren. (28) (30) (32) (34) (40) (41) (42)

Voor de electrolyser wordt als uitgangspunt genomen dat de druk van de geproduceerde waterstof 30 bar is. Voor opslag of transport vindt er vervolgens eerst compressie plaats. Voor transport met een tubetrailer is 300 bar een geschikte druk. Tabel 8 toont de kosten en levensduur van een dergelijke compressor. Operationele kosten van een compressor zijn het energieverbruik en het onderhoud. Het geschatte energieverbruik van 10% betreft zowel de energie om de compressor mee aan te drijven als de energie die verloren gaat door warmte en lekkage.

De International Council on Clean Transportation (ICCT) berekent de CAPEX van compressie met behulp van een formule (34). De capaciteit, de input druk en de output druk zijn belangrijke parameters waarmee de kosten worden bepaald. Voor een compressor die per uur de druk van 18 kg H₂ moet verhogen van 30 naar 300 bar zijn volgens deze formule de kosten € 157.000. Het energieverbruik van de compressor zoals genoemd door de ICCT heeft betrekking op de verhoging van de druk van 18 naar 40 bar. Dit energieverbruik is daardoor veel lager dan voor de compressie die in dit onderzoek nodig is. Het geschatte energieverbruik van 10% is ontleend aan de andere genoemde bronnen.

Tubetrailers

Tubetrailer	
Capaciteit (kg)	300
Druk (bar)	300
Kosten (€/kg capaciteit)	€ 500
CAPEX	€ 150.000
Levensduur (jaren)	12
Variabele kosten (per km)	€ 1,28
Afstand (km, retour)	80
Chauffeur (€/uur)	€ 35
Tijd (uren/transport)	4
O&M (% van Capex)	2

Tabel 9 Basisgegevens tubetrailers. (29) (30) (Opgave Holthausen).

Voor het transport van waterstof over de weg wordt gebruik gemaakt van tubetrailers. De tubetrailers worden aangeschaft voor het project en maken dus deel uit van de CAPEX. Volgens de geraadpleegde bronnen kost een tubetrailer ongeveer € 300 per kilogram capaciteit. De looptijd van het project is gesteld op 15 jaar. Aangezien de levensduur van een tubetrailer geschat wordt op 12 jaar wordt er tijdens de looptijd van het project een nieuwe tubetrailer aangeschaft. Dit verklaart de

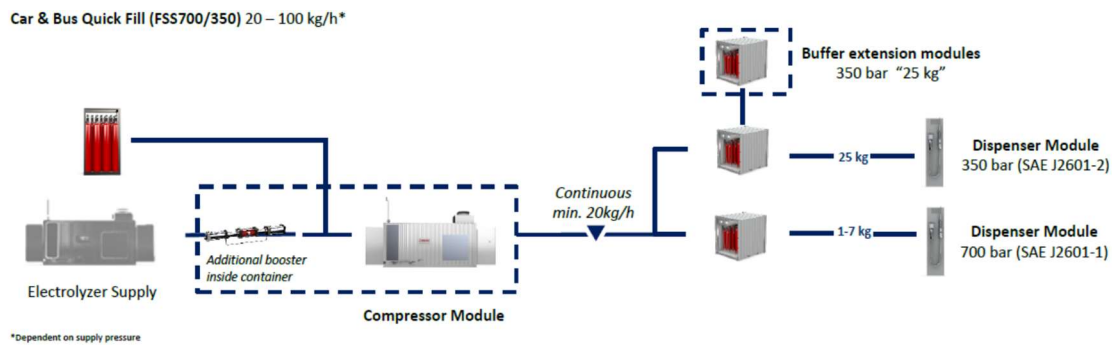
in Tabel 9 genoemde restwaarde. De kosten van de truck worden per transport gerekend en zijn dus variabele kosten.

Tankstation

Tankstation	
Investering	€ 1.174.302
Levensduur	10
Buffer en dispenser bus (bar)	350
Buffer en dispenser auto (bar)	700 bar
Vermogen (kW)	200
Exploitatie	
Energie (€/kg)	€ 0,61
Onderhoud (€/jr)	€ 27.000
Schoonmaak (€/jr)	€ 3.000
Verzekering (€/jr)	€ 12.000
Storing (€/jr)	€ 10.000
Beheer (€/jr)	€ 25.000
Huur (€/jr)	€ 12.000
Totaal	€ 89.000

Tabel 10 Basisgegevens tankstation (Offerte Resato).

De investering voor het tankstation is conform de offerte van Resato die een onderdeel is van de H2GROw projectaanvraag. Het tankstation bestaat uit opslag, compressor, buffer en dispenser (Figuur 3). De opslag kan een tubetrailer zijn maar ook een tank of een bottle rack.



Figuur 3 Schematische voorstelling van het tankstation (Offerte Resato).

De standaard capaciteit van het station is 20 kg per uur bij 50 bar toevoerdruk, hiermee kunnen 3 auto's direct achter elkaar tanken. Daarna moet de buffer weer worden gevuld. De capaciteit van het station kan worden verhoogd door een grotere buffer na compressie, hiervoor is geen extra compressor benodigd. In Figuur 3 is dit weergegeven als de "Buffer extension modules". Een extra buffer van 25 kg en 350 bar kost € 42.000. Voor een buffer van 100 kg bedraagt dit € 106.000.

Wanneer er niet getankt wordt zorgt het systeem zelf dat de buffer weer op druk gezet wordt, zodat het systeem weer klaar is voor meerdere auto's achter elkaar.

Een onderzoek van het Amerikaanse Department Of Energy vergelijkt de kosten van 111 gerealiseerde en geplande waterstoftankstations (43). Een gemiddeld tankstation heeft in dit onderzoek een capaciteit van 770 kg per dag en kost \$ 1,4 mln (circa € 1,27 mln). De kosten van het Resato tankstation zijn hiermee in lijn gezien de iets kleinere capaciteit.

Opslag

Het tankstation heeft waterstofopslag met verschillende druk. Voor de voertuigen die waterstof met een druk van 700 bar nodig hebben is er een buffer in een container met de volgende specificaties:

Druk	Volume (liter water)	Secties	Type	Fase
300 bar	1800	2 * 900	Staal	1
480 bar	1800	2 * 900	Staal	2
950 bar	508	2 * 254	Composiet	3

Tabel 11 Buffer opslag voor voertuigen met een druk van 700 bar.

De opslag is dus zo ontworpen dat de waterstof in een aantal stappen op de benodigde druk wordt gebracht. Resato geeft aan dat de voordelen van dit systeem bestaan uit een langere levensduur van de componenten en een betere efficiëntie.

Voor de voertuigen die waterstof met een druk van 350 bar nodig hebben is er een buffer in een container met de volgende specificaties:

Druk	Volume (liter water)	Secties	Type	Fase
300 bar	900	1 * 900	Staal	1
480 bar	900	1 * 900	Staal	2

Tabel 12 Buffer opslag voor voertuigen met een druk van 350 bar.

Volgens de International Energy Agency bedragen de kosten van een waterstoftank tot een capaciteit van 300 kg tussen de € 180 en € 300 per kg (30). Een tank met een capaciteit van 100 kg zou op basis van deze gegevens dus tussen de € 18.000 en € 30.000 kosten. Op deze wijze kan er opslagcapaciteit aan het tankstation worden toegevoegd, in Figuur 3 wordt deze capaciteit weergegeven in de vorm van de cilinders aan het begin van het proces.

Voertuigen

Kenmerken	Vrachtauto	Bestelbus
Aanschaf	€ 105.000	€ 30.000
ombouw	€ 332.525	€ 112.000
CAPEX	€ 437.525	€ 142.000
Levensduur (jaren)	8	8
Restwaarde	€ 54.691	€ 17.750
Elektromotor (kW)	180	81
Energieverbruik (Wh/km)	1360	400
Accu vermogen (kWh)	140	18
Accu voltage (V)	720	360
Bereik Accu (km)	102	45

Brandstofcel vermogen (kW)	30	12
Waterstof cilinders (kg) (2 * 200 L 700 bar)	15	2,3
Bereik (km)	187,5	97,75
Bereik totaal	289,5	142,75
Vergelijkbaar verbruik diesel (liter/100 km)	25	5,8

Tabel 13 Basisgegevens voertuigen gebaseerd op informatie verstrekt door Holthausen Clean Technology.

De gegevens betreffende de vrachtauto en de bestelbus zijn gebaseerd op de offertes van Holthausen Clean Technology die een onderdeel zijn van de projectaanvraag. In het kader van het project zijn vier vrachtauto's en acht bestelbussen omgebouwd van dieselveertuig naar waterstofvoertuig. De dieselmotor met toebehoren is vervangen door een elektrische aandrijflijn en tevens is een waterstof range extender geplaatst.

De voertuigen zijn voorzien van een accu pakket waarop elektrisch kan worden gereden. De accu wordt tijdens het rijden bijgeladen door de H2-brandstofcel vandaar dat deze unit wordt omschreven als een range extender.

Zoals eerder gesteld wordt er voor deze kosten-batenanalyse in eerste instantie uitgegaan van de opzet van het project. De beschikbaarheid en kosten van andere waterstof aangedreven voertuigen en de impact daarvan op de analyse zullen later worden besproken.

Totale kosten

PV	€ 565.000
Electrolyser	€ 1.500.000
Compressor	€ 157.000
Opslag	€ 106.644
Tubetrailer	€ 150.000
Opslag	€ 106.644
Tankstation	€ 1.174.302
Vrachtwagens	€ 1.750.100
Bestelbussen	€ 1.136.000
Totaal	€ 6.645.690

Tabel 14 Totale investering van het project.

De totale investering (CAPEX) van het project gebaseerd op de besproken gegevens bedraagt €6,6 miljoen. Met deze investering wordt een hernieuwbare waterstofketen waarbij zonne-energie wordt gebruikt voor waterstofproductie om daarmee voertuigen van brandstof te voorzien. In het volgende hoofdstuk zullen de verwachte effecten van dit project worden besproken.

7. Effecten

In dit hoofdstuk zullen de effecten van de hernieuwbare waterstofketen worden geïdentificeerd, gekwantificeerd en gemonetariseerd. Deze drie stappen zijn onderdeel van een maatschappelijke kosten-batenanalyse (5) en worden in dit rapport in hun onderlinge samenhang besproken. De effecten zullen worden besproken in de volgorde van de supply chain van de hernieuwbare waterstofketen.

Er worden drie situaties onderscheiden:

1. Uitsluitend PV en een beperkte vloot.
In dit geval wordt er alleen waterstof geproduceerd met PV elektriciteit. De voertuigenvloot bestaat uit de voertuigen zoals omschreven in het H2Grow project, namelijk vier vuilniswagens en acht bestelbussen.
2. Elektriciteit van PV en van het net met een beperkte vloot.
Er wordt waterstof geproduceerd met PV elektriciteit aangevuld met ingekochte elektriciteit van het net. Op deze manier kan de electrolyser meer uren produceren. Overtollige waterstof wordt tegen kostprijs verkocht. De voertuigenvloot bestaat uit de voertuigen zoals omschreven in het H2Grow project, namelijk vier vuilniswagens en acht bestelbussen.
3. Elektriciteit van PV en van het net met een uitgebreide vloot.
In deze situatie wordt de electrolyser zoveel mogelijk benut en alle waterstof gaat naar het tankstation. Er wordt uitgegaan van een grotere voertuigenvloot.

Elektriciteit

Het eerste effect is de productie van elektriciteit door de zonnepanelen. Voor de bepaling van deze productie is gebruik gemaakt van de urengegevens van het weer in Eelde van het KNMI (44). Voor de jaren 2019, 2020 en 2021 is per uur de duur van de zonneschijn (in 0,1 uren) en de globale straling (in J/cm²) gebruikt. Met deze gegevens is vervolgens berekend wat de elektriciteitsproductie van een PV-installatie met een vermogen van 1 MW per uur zou zijn verdeeld over alle uren van het jaar. De totale productie per jaar bedraagt volgens deze berekening circa 1.300 MWh. Dit komt redelijk overeen met de verwachte opbrengst van zonnepanelen volgens de SDE+ regeling (25).

Indien er uitsluitend waterstof wordt geproduceerd met elektriciteit die afkomstig is van de zonnepanelen te Zuidwending dan betekent dit dat de electrolyser alleen wordt gebruikt wanneer de zon schijnt. Indien de elektrolyser 24 uur per dag operationeel is dan is de elektriciteitsbehoefte op jaarbasis gelijk aan 8.760 MWh. De PV-installatie te Zuidwending produceert zoals gezegd naar verwachting 1.300 MWh. Het verschil zal dus op jaarbasis moeten worden ingekocht. Voor ieder uur in het jaar is daarom bepaald hoeveel extra elektriciteit er moet worden ingekocht om de electrolyser volledig te benutten. De kosten van deze elektriciteit zijn bepaald met behulp van de APX data (45). Het gaat daarbij om de day-ahead prijzen van elektriciteit op de Nederlandse markt.

Voor de elektriciteit die wordt gekocht moeten ook transportkosten worden betaald. Voor 2021 zijn deze vastgesteld op € 6,20 per MWh (46). Dit is het tarief dat door afnemers van elektriciteit moet worden betaald die zijn aangesloten op het middenspannings- of laagspanningsnet. De kosten van het vastrecht van een aansluiting worden buiten beschouwing gelaten. Het project veroorzaakt geen extra aansluitingskosten aangezien de aansluiting al aanwezig is.

Om de geproduceerde waterstof CO₂-vrij te laten zijn is het nodig om gebruik te maken van CO₂-vrije elektriciteit. Voor de elektriciteit die wordt ingekocht moet daarom ook een Garantie van Oorsprong (GVO) worden aangeschaft. De kosten van een GVO moeten worden geschat. De prijzen van een GVO worden bepaald door overeenkomsten tussen producenten van duurzame energie en certificatenhandelaren (inclusief energiebedrijven). Van deze markt zijn daarom geen openbare prijzen voorhanden. De prijs van een GVO windenergie in Europa wordt geschat op € 2,00 (47).

	2020	2025	2030	2035
Elektriciteit	€ 312.000	€ 357.000	€ 414.000	€ 464.000
Transportkosten netwerk	€ 45.000	€ 49.000	€ 54.000	€ 59.000
Kosten GVO	€ 15.000	€ 16.000	€ 17.000	€ 19.000

Tabel 15 Kosten ingekochte elektriciteit, transport en GVO per jaar.

Tabel 15 laat de verwachte kosten zien die de inkoop van elektriciteit met zich meebrengt. Voor zowel de elektriciteit als het transport en de certificaten wordt uitgegaan van een jaarlijkse prijsstijging van 2 procent conform de Klimaat- en energieverkenning 2020 van ECN (48). Deze prijsstijging is onzeker hetgeen ook blijkt uit de bandbreedte die ECN hanteert. Recente geo-politieke ontwikkelingen en daarmee gepaard gaande stijgingen van de energieprijzen zijn in de literatuur ook nog niet verwerkt in de scenario's.

	2019	2020	2021	2022 (t/m 23 aug)
Minimum	-€ 9,02	-€ 79,19	-€ 66,18	-€ 222,36
Maximum	€ 121,46	€ 200,04	€ 620,00	€ 794,95
Gemiddeld	€ 41,20	€ 32,29	€ 102,97	€ 234,82

Tabel 16 Minimum, maximum en gemiddelde prijs in euro's per MWh op de day ahead elektriciteitsmarkt.

Tabel 16 toont de minimum, de maximum en de gemiddelde prijs in euro's per MWh volgens de ENTSOE gegevens. Het is duidelijk te zien dat de gemiddelde elektriciteitsprijs sterk is gestegen en dat ook de uitschieters groter zijn. In de gevoeligheidsanalyse worden ingegaan op de gevolgen van hogere elektriciteitsprijzen voor de resultaten. Eerst wordt uitgegaan van de ECN verwachtingen en wordt er verondersteld dat het huidige prijsniveau niet representatief is voor de lange termijn.

Voor de situatie waarbij alleen de pv installatie wordt gebruikt en er sprake is van een beperkte vloot hoeft er geen elektriciteit te worden ingekocht. Tabel 15 en Tabel 16 zijn dus alleen van toepassing in situatie 2 en 3 waarbij de elektrolyser volledig wordt benut.

Compressie

Voor de opslag van de geproduceerde waterstof is compressie nodig. Voor de compressor blijkt uit de basisgegevens dat de energie die nodig is voor de compressie 10 procent bedraagt van de energie van het gas dat moet worden gecomprimeerd. Deze 10 procent betreft zowel de elektriciteit die nodig is om de compressor aan te drijven als de verliezen die optreden door lekkage en wrijving. Tabel 17 toont de verwachte operationele kosten van de compressie van waterstof per jaar.

Compressiekosten	Vloot	2020	2025	2030	2035
Uitsluitend PV	Beperkt	€ 2.250	€ 2.500	€ 2.750	€ 3.000
PV + net	Beperkt	€ 3.250	€ 3.750	€ 4.000	€ 4.500
PV + net	Uitgebreid	€ 23.000	€ 25.500	€ 28.500	€ 30.500

Tabel 17 OPEX kosten per jaar van compressie waterstof van 30 naar 300 bar.

Indien er uitsluitend gebruik wordt gemaakt van PV zijn de compressiekosten het laagst omdat er voor de elektriciteit die bij de compressie nodig is geen transportkosten en garantie van oorsprong hoeft te worden betaald. Deze kosten worden wel gemaakt in het geval er zowel elektriciteit van PV als van het net wordt gebruikt. In deze tweede situatie wordt de electrolyser zoveel mogelijk benut. Omdat er wordt uitgegaan van de voertuigenvloot van het project (8 bestelbussen en 4 vuilniswagens) wordt slechts een deel van de waterstof voor het tankstation benut. In de derde situatie wordt de electrolyser zoveel mogelijk benut en alle waterstof gaat naar het tankstation. Er wordt uitgegaan van een grotere voertuigenvloot.

Transport en opslag

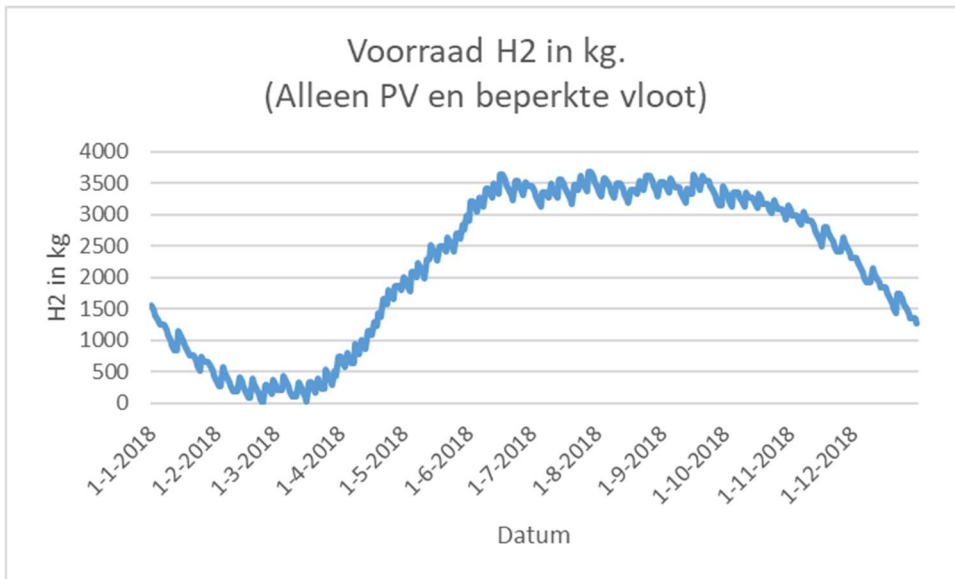
Het transport van waterstof kan worden gedaan door middel van pijpleidingen en tubetrailers. Transport via pijpleidingen veroorzaakt hoge investeringskosten die pas bij grote volumes kunnen worden terugverdiend. Het transport vindt dus plaats met gebruik van tubetrailers. De grootte van de tubetrailers hangt samen met de grootte van de opslag en met het aantal transportbewegingen. Bij gebruik van een grotere tubetrailer is voor het lossen een grotere opslagtank nodig. Tegelijkertijd hoeft er minder vaak gereden te worden.

Transportkosten	Vloot	Aantal ritten per jaar	2020	2025	2030	2035
Uitsluitend PV	Beperkt	69	€ 16.500	€ 18.000	€ 20.000	€ 22.000
PV + net	Beperkt	69	€ 16.500	€ 18.000	€ 20.000	€ 22.000
PV + net	Uitgebreid	513	€ 124.000	€ 134.500	€ 148.500	€ 164.000

Tabel 18 OPEX kosten per jaar van transport van waterstof per tube trailer.

Ook de wijze waarop de elektrolyser wordt ingezet heeft invloed op transport en opslag. Indien er uitsluitend gebruik wordt gemaakt van PV is er sprake van een sterke seizoensinvloed. In de zomer wordt er dan meer waterstof geproduceerd waarvan een deel moet worden opgeslagen voor gebruik in de winter. Figuur 4 toont deze seizoensinvloed. In kwartaal 1 van het jaar is de vraag groter dan de productie waardoor de voorraad daalt. In kwartaal 2 en 3 stijgt de voorraad dankzij de hogere PV-productie. In kwartaal 4 daalt de voorraad naar het niveau van het begin van het jaar. Uit Figuur 4 blijkt dat de opslag in deze situatie 3.700 kg waterstof groot moet zijn.

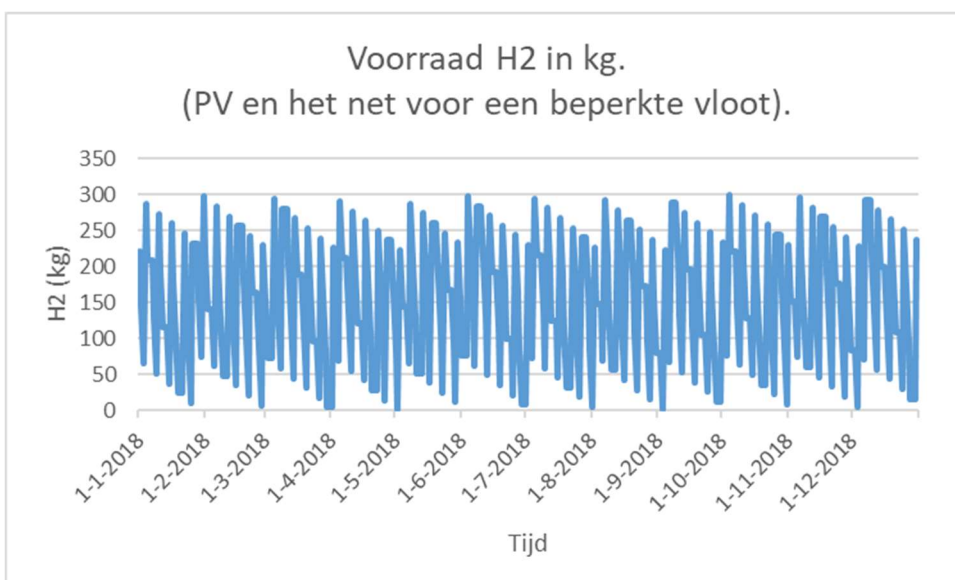
Niet alle waterstof wordt naar het tankstation getransporteerd. In de zomermaanden is er een overschot aan waterstofproductie. Deze waterstof wordt niet naar het tankstation getransporteerd maar tegen kostprijs verkocht. Transport naar het tankstation zou de behoefte aan opslag nog doen toenemen.



Figuur 4 Voorraad H2 in kg bij gebruik PV en een beperkte vloot.

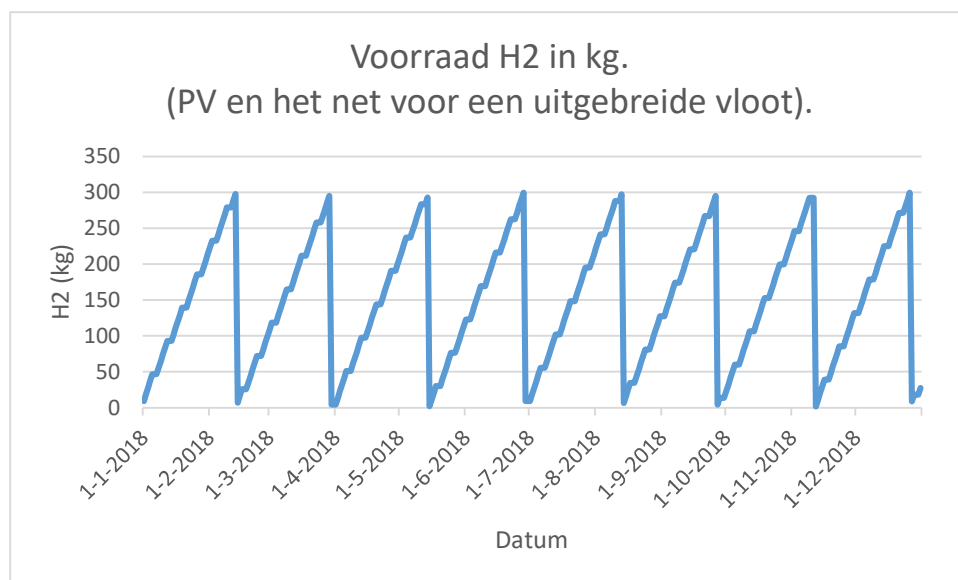
Indien er ook groene stroom wordt ingekocht via het elektriciteitsnet dan stijgt de productie van waterstof naar 432 kg per dag. Volgens de opzet van het project H2GROW is de vraag naar waterstof afkomstig van vier vuilnisauto's en acht bestelbussen. Om het tankstation in deze situatie te bevoorraden wordt er uitgegaan van tubetrailers met een capaciteit van 300 kg en opslag bij het tankstation met dezelfde capaciteit.

De bestelbussen tanken 1 keer per dag 2,3 kg waterstof, de vuilniswagens tanken 15 kg. Voor 8 bestelbussen en 5 vuilniswagens resulteert dit in een vraag van 93,4 kg per dag. Aangenomen wordt dat alle wagens alleen maandag tot en met vrijdag in gebruik zijn. Figuur 5 laat de verandering van de voorraad zien zoals deze zich in dit geval ontwikkelt. Op jaarbasis wordt de opslagtank in dit scenario 82 keer per jaar gevuld. Een opslagcapaciteit van 300 kg is in deze situatie toereikend.



Figuur 5 Voorraad H2 in kg bij gebruik PV en het net voor een beperkte vloot.

Een derde mogelijkheid is dat alle in Zuidwending geproduceerde waterstof naar het tankstation wordt getransporteerd. Een vloot van bijvoorbeeld 8 bestelbussen en 39 vrachtwagens zou dit kunnen afnemen. Wat dit zou betekenen voor de bezetting van het tankstation wordt later besproken. Figuur 6 toont de ontwikkeling van de voorraad. Op jaarbasis wordt de opslagtank in dit scenario 513 keer gevuld. Een opslagcapaciteit van 300 kg is in deze situatie toereikend. Er wordt op werkdagen 600 kg waterstof aangevoerd en 590 kg getankt. De voorraad groeit hierdoor geleidelijk. Na 30 werkdagen is de opslag vol en kan er één bevoorrading worden overgeslagen.



Figuur 6 Voorraad H2 in kg bij gebruik van PV en het net voor een uitgebreide vloot.

Exploitatie tankstation

Het tankstation gebruikt energie, met name om de druk te verhogen van de waterstof die wordt aangevoerd. Uit de literatuur blijkt dat een tankstation ongeveer 3 kWh gebruikt per kg waterstof. Uitgaande van de gemiddelde elektriciteitsprijs inclusief de transportkosten en een garantie van oorsprong resulteert dit in de volgende kosten.

Kosten exploitatie tankstation	Vloot	2020	2025	2030	2035
Uitsluitend PV	Beperkt	€ 8.800	€ 9.900	€ 11.000	€ 11.900
PV + net	Beperkt	€ 8.800	€ 9.900	€ 11.000	€ 11.900
PV + net	Uitgebreid	€ 59.000	€ 65.000	€ 72.500	€ 80.000

Tabel 19 OPEX van waterstoftankstation per jaar.

Onderhoud

Voor de vaste activa die deel uitmaken van het project zullen onderhoudskosten worden gemaakt. Bij de omschrijving van het projectalternatief zijn van de diverse activa de onderhoudskosten gegeven als een percentage van de investering (CAPEX). Van het tankstation zijn de onderhoudskosten gespecificeerd en geschat op € 89.000 per jaar.

Vaste activa	Onderhoud	2020	2025	2030	2035
PV-installatie	1 %	€ 7.500	€ 8.500	€ 9.000	€ 10.000
Electrolyser	4 %	€ 60.000	€ 66.000	€ 73.000	€ 79.000
Compressor	4 %	€16.250	€ 18.000	€ 20.000	€ 21.500
Tube trailer	2 %	€ 3.000	€ 3.300	€ 3.600	€ 3.900
Tankstation	€ 89.000	€ 89.000	€ 98.000	€ 108.500	€ 117.500
Vrachtwagen (€/km)	€ 0,185	€ 0,185	€ 0,204	€ 0,226	€ 0,249
Bestelbus(€/km)	€ 0,07	€ 0,07	€ 0,077	€ 0,085	€ 0,094

Tabel 20 Onderhoudskosten van vaste activa per jaar.

De onderhoudskosten voor de vrachtwagens en de bestelbussen omvatten de kosten van olie, reparaties, preventief onderhoud en banden zoals onderzocht door de International Council on Clean Transportation (ICCT) (49), Argonne National Laboratory (50) en Panteia (51). In eerste instantie wordt aangenomen dat de onderhoudskosten voor een dieselveertuig en voor een waterstofvoertuig gelijk zijn aan elkaar. In de kosten- batenanalyse zal het onderhoud daardoor geen impact hebben, de onderhoudskosten voor het waterstofvoertuig vervangen de even hoge onderhoudskosten aan het dieselveertuig. Toch zullen de onderhoudskosten in het overzicht worden opgenomen om inzicht te bieden in de totale kosten.

Vermeden brandstofkosten

De tot nu toe besproken effecten betroffen de productie, compressie, opslag en distributie van waterstof. De voertuigen die op waterstof gaan rijden vervangen in principe dieselveertuigen. Een direct effect van de hernieuwbare waterstofketen is dus het vermijden van de kosten van diesel.

De dieselprijs aan de pomp bestaat uit meerdere componenten. Tabel 21 laat zien dat de gemiddelde dieselprijs aan de pomp inclusief BTW voor de periode 2012-2021 142,22 eurocent per liter bedroeg (€ 1,42/l). De prijs zonder accijnzen, heffingen en BTW was 68,94 eurocent per liter (€ 0,69/l). Voor een MKBA worden belastingen buiten beschouwing gelaten. De reden hiervoor is dat belastingen en subsidies altijd een kostenpostvormen voor de partij die betaalt en een opbrengst voor de partij die ontvangt. Bij een MKBA gaat het om de kosten en baten van alle partijen gezamenlijk. Een belasting of subsidie is in dat geval dus altijd een kostenpost en een baat. Het is gebruikelijk om belastingen en subsidies daarom buiten beschouwing te laten. In Bijlage 1 wordt de dieselprijs per jaar over de periode 2012-2021 weergegeven. De gegevens zijn ontleend aan Mobiliteit in cijfers auto's van de BOVAG en RAI van de betreffende jaren.¹⁰

Gemiddelde prijsopbouw diesel (centen/liter)	Gemiddeld (2012-2021)
Productieprijs af-raffinaderij (Argus)	48,39
Margetraject (marge oliemij, marge pomphouders, distributie- en marketingkosten, kortingen)	20,55
Prijs voor accijnzen, heffingen en BTW	68,94
Accijnzen + heffingen	48,80
Pompprijs excl BTW	117,74
BTW 21 %	24,48
Pompadviesprijs incl BTW in eurocenten/liter	142,22
Accijns, heffingen en BTW in eurocenten/liter	73,29
Overheidsaandeel in % van de pompprijs	51,82

¹⁰ <https://bovagrai.info/auto/2021/fiscale-betekenis/6-5-opbouw-brandstofprijzen/>

Tabel 21 Opbouw gemiddelde dieselprijs in centen per liter aan de pomp over de periode 2012 - 2021.

Om te bepalen hoeveel dieselkosten er worden vermeden moet de toekomstige prijsontwikkeling van diesel worden geschat. Op basis van deze schatting kunnen vervolgens de vermeden dieselkosten worden berekend. Voor de schatting van de toekomstige dieselprijs is gebruik gemaakt van de nationale klimaat- en energieverkenning van ECN 2021 (52). ECN voorspelt een olieprijs van \$ 50 per vat in 2025 en \$ 70 per vat in 2030. Het spreekt vanzelf dat deze verwachtingen hoogst onzeker zijn (de onzekerheidsmarge voor de voorspelling voor 2030 is van \$ 50 tot \$ 110) en in de gevoeligheidsanalyse zal hier verder op in worden gegaan.

Net als bij de elektriciteitsprijs is geen rekening gehouden met de recente geo-politieke ontwikkelingen en de gevolgen daarvan voor de olieprijs. Op 1 januari 2022 kostte een vat Brent crude oil \$ 67,87 en op 9 juni 2022 was dit \$ 92,04.

In Bijlage 2 is de verwachte ontwikkeling van de dieselprijs weergegeven. Er wordt uitgegaan van de verwachting van ECN en tussenliggende jaren worden door middel van extrapolatie berekend. De basis is hierbij de verwachte ontwikkeling van de olieprijs per vat. Alle onderdelen van de dieselprijs zoals genoemd in Tabel 21 veranderen met hetzelfde percentage.

Diesilverbruik

De beperkte vloot bestaat uit 4 vrachtauto's en 8 bestelbussen. Uitgaande van het bereik van de waterstofvoertuigen kunnen deze respectievelijk 188 en 98 kilometer rijden per tank. Op basis van het eerder besproken verbruik van een dieselveertuig heeft een vrachtauto hiervoor 47 liter diesel nodig en een bestelbus 5,7. De totale dieselvraag per dag is daarmee 233 liter diesel. Indien de voertuigen 260 dagen per jaar rijden (5 dagen per week) komt de totale vraag daarmee op 60.500 liter.

In het geval het aantal waterstofvoertuigen wordt uitgebreid naar 8 bestelbussen en 39 vrachtwagens stijgt de vraag naar diesel naar 477.000 liter per jaar. Tabel 22 toont de vermeden dieselkosten voor zowel de beperkte vloot als voor de uitgebreide vloot waterstofvoertuigen.

Vermeden dieselkosten	Vloot	2020	2025	2030	2035
Dieselprijs voor accijnzen, heffingen en BTW (€ cnt/liter)		40,99	63,42	85,85	91,26
Uitsluitend PV	Beperkt	€ 25.000	€ 38.500	€ 52.000	€ 55.000
PV + net	Beperkt	€ 25.000	€ 38.500	€ 52.000	€ 55.000
PV + net	Uitgebreid	€ 196.000	€ 303.000	€ 410.500	€ 431.000

Tabel 22 Vermeden dieselkosten per jaar voor een beperkte en een uitgebreide vloot waterstofvoertuigen.

Het is van belang om op te merken dat in de vermeden dieselkosten alle kosten van productie, distributie en levering van diesel zijn opgenomen. Met de dieselprijs aan de pomp worden immers alle stappen in de dieselketen vergoed. Het dieselpompstation is bijvoorbeeld geen aparte vermeden kostenpost. De kosten van dit pompstation zijn inbegrepen in de dieselprijs.

Vermeden CO2 uitstoot

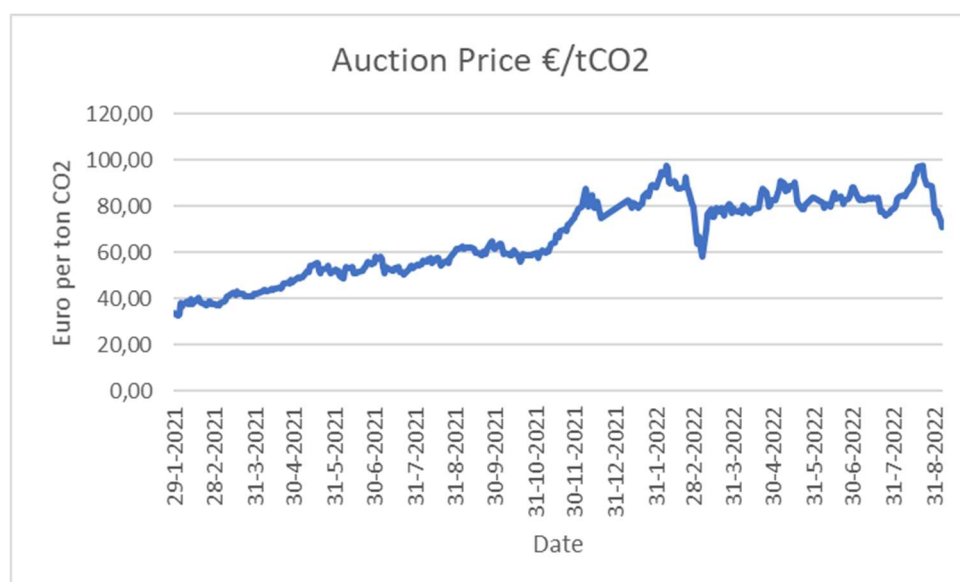
Het vermeden gebruik van diesel leidt tot een reductie van de uitstoot van CO2. Diesel als brandstof voor voertuigen resulteert in een uitstoot van 3,230 kg CO2 per liter diesel (53). Het gaat hierbij om de well-to-wheel emissies aangezien de totale uitstoot van de dieselproductie wordt vermeden indien deze diesel niet wordt gebruikt. Voor het vaststellen van de prijs van een ton CO2 wordt in eerste instantie uitgegaan van de gemiddelde prijs van € 30 in 2020 zoals deze wordt gerapporteerd

door het EEX, het platform dat CO2 emissierechten veilt (54) en van de raming van de CO2-prijs van € 62 in 2030 volgens de Klimaat- en energieverkenning 2021 (52). Er is verondersteld dat de prijs van een ton CO2 zich in de andere jaren gelijkmatig ontwikkelt. In Tabel 23 zijn de vermeden CO2-kosten te zien voor zowel een beperkte vloot waterstofvoertuigen als voor een uitgebreide vloot.

Vermeden CO2-kosten	Vloot	2020	2025	2030	2035
CO2 prijs (€/ton)		€ 30	€ 46	€ 62	€ 78
Uitsluitend PV	Beperkt	€ 4.800	€ 7.000	€ 9.800	€ 12.600
PV + net	Beperkt	€ 4.800	€ 7.000	€ 9.800	€ 12.600
PV + net	Uitgebreid	€ 37.400	€ 55.100	€ 77.300	€ 99.400

Tabel 23 Vermeden CO2-kosten per jaar voor een beperkte en een uitgebreide vloot waterstof voertuigen.

Net als bij de elektriciteitsprijs en de dieselprijs is de huidige geo-politieke situatie van invloed op de CO2-prijs¹¹. Figuur 7 Prijs in euro's per ton CO2 van EEX marktgegevens. Figuur 7 toont de recente prijsontwikkeling waarbij opvalt dat de CO2-prijs ook voor de aanvang van de oorlog in Oekraïne al boven de verwachting van de Klimaat- en energieverkenning uitstijgt. In de gevoeligheidsanalyse zal worden onderzocht wat de gevolgen zijn van een hogere CO2 prijs voor de kosten-batenanalyse.



Figuur 7 Prijs in euro's per ton CO2 van EEX marktgegevens.

¹¹ <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-primary-auction-spot-download>

8. Maatschappelijke Kostenbatenanalyse

Voor het opstellen van de maatschappelijke kostenbatenanalyse wordt gebruik gemaakt van de tot nu toe besproken gegevens. Voor drie alternatieven is een kastroomoverzicht over een periode van 15 jaren opgesteld (zie Bijlage 3, Bijlage 4 en Bijlage 5). Bij het opstellen van deze kastroomoverzichten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Vaste activa met een kortere economische levensduur moeten gedurende de looptijd worden vervangen. Vaste activa met een langere economische levensduur hebben een restwaarde gebaseerd op aanschafwaarde minus lineaire afschrijvingen.
- Niet monetaire kosten en baten zoals vermeden CO₂ uitstoot worden wel in het kastroomoverzicht opgenomen tegen hun gemonetariseerde waarde.
- In het geval er meer waterstof wordt geproduceerd dan er door de waterstofvoertuigen wordt afgenomen, wordt de resterende waterstof tegen de kosten van productie, compressie en opslag verkocht.
- Kosten en opbrengsten waarbij geen specifiek onderbouwde prijsontwikkeling is besproken stijgen met een jaarlijkse inflatie van 2%.
- De discontovoet waarmee de contante waarde van toekomstige geldstromen wordt berekend bedraagt 6% (55). Hierbij wordt aangehouden dat waterstof voor mobiliteit zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling bevindt en er daarom sprake is van een relatief hoge discontovoet.

In Tabel 24 is de maatschappelijke kostenbatenanalyse te zien van de hernieuwbare waterstofketen voor mobiliteit zoals deze het uitgangspunt vormt voor het H2Grow project. Er wordt uitsluitend gebruik gemaakt van stroom die is opgewekt door de zonnepanelen te Zuidwending. Er wordt daarmee voldoende waterstof geproduceerd voor de vier vrachtwagens en de acht bestelbussen die voor het project worden omgebouwd tot waterstofvoertuigen.

De netto contante waarde van het project is ruim € 9 mln negatief. Er is ook sprake van een jaarlijkse negatieve exploitatie, de opbrengsten zijn lager dan de exploitatiekosten. Deze conclusies zijn geen verrassing, het is niet te verwachten dat het opzetten van een leveringsketen voor een zeer beperkt aantal voertuigen rendabel zou zijn.

Kosten		Baten	
CAPEX			
PV	€ 470.698	Vermeden brandstofkosten	€ 389.687
Electrolyser	€ 1.343.526	Vermeden CO2-uitstoot	€ 78.558
Vervanging stack	€ -	Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 661.607
Compressor	€ 157.239	Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 378.061
Tube trailer	€ 177.603	Opbrengst waterstof	€ 441.349
Opslag	€ 884.846	Onderhoud vrachtwagens	€ 395.397
Tankstation	€ 1.585.029	Onderhoud bestelbussen	€ 155.993
Vrachtwagens	€ 2.756.852		€ 2.500.651
Bestelbussen	€ 1.789.489		
	€ 9.165.282		
OPEX			
Elektriciteit voor productie H2	€ -		
Transportkosten netwerk	€ -		
Kosten GVO	€ -		
Compressie	€ 39.335		
transport	€ 77.382		
Chauffeur	€ 105.796		
Elektriciteit tankstation	€ 19.676		
Onderhoud:	€ -		
PV	€ 61.926		
Electrolyser	€ 657.624		
Compressor	€ 68.936		
Tube trailer	€ 32.881		
Tankstation	€ 975.476		
Vrachtwagens	€ 395.397		
Bestelbussen	€ 155.993		
	€ 2.590.422	NPV	€ 9.255.053
Totaal	€ 11.755.703	Totaal	€ 11.755.703

Tabel 24 MKBA bij uitsluitend gebruik van PV en een beperkte vloot.

Een aandachtspunt is het effect van de keuze voor uitsluitend PV-stroom op de benodigde opslagcapaciteit. De zonnepanelen produceren met name elektriciteit in de zomer. Er moet daarom waterstof worden opgeslagen om de seizoenschommelingen op te vangen. Dit veroorzaakt relatief hoge opslagkosten.

Tabel 25 toont de maatschappelijke kostenbatenanalyse bij gebruik van PV aangevuld met ingekochte groene stroom van het elektriciteitsnet. Er wordt daardoor aanzienlijk meer waterstof geproduceerd. Omdat er ook hier wordt uitgegaan van de beperkte voertuigenvloot wordt het grootste gedeelte van deze waterstof tegen de productie kostprijs verkocht. De netto contante waarde is voor deze variant € 5,8 miljoen negatief. Het verschil wordt verklaard door de betere benutting van de electrolyser. Met de hogere productie worden de vaste kosten van de electrolyser beter terugverdiend. Verder zijn er dankzij de continue productie (met stroom van het netwerk) geen extra opslagkosten noodzakelijk. Wel moet de stack van de electrolyser elke 5 jaar worden vervangen (40.000 draaiuren).

Kosten		Baten	
CAPEX			
PV	€ 470.698	Vermeden brandstofkosten	€ 389.687
Electrolyser	€ 1.343.526	Vermeden CO2-uitstoot	€ 78.558
Vervanging stack	€ 685.468	Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 661.607
Compressor	€ 157.239	Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 378.061
Tube trailer	€ 177.603	Opbrengst waterstof	€ 8.248.420
Opslag	€ -	Onderhoud vrachtwagens	€ 395.397
Tankstation	€ 1.585.029	Onderhoud bestelbussen	€ 155.993
Vrachtwagens	€ 2.756.852		
Bestelbussen	€ 1.789.489		
			€ 10.307.722
	€ 8.965.903		
OPEX			
Elektriciteit voor productie H2	€ 3.672.347		
Transportkosten netwerk	€ 493.088		
Kosten GVO	€ 159.061		
Compressie	€ 266.007		
transport	€ 77.382		
Chauffeur	€ 105.796		
Elektriciteit tankstation	€ 19.676		
Onderhoud:	€ -		
PV	€ 61.926		
Electrolyser	€ 657.624		
Compressor	€ 68.936		
Tube trailer	€ 32.881		
Tankstation	€ 975.476		
Vrachtwagens	€ 395.397		
Bestelbussen	€ 155.993		
	€ 7.141.590	NPV	€ 5.799.772
Totaal	€ 16.107.494	Totaal	€ 16.107.494

Tabel 25 MKBA bij gebruik van PV en elektriciteitsnet en een beperkte vloot.

Tabel 26 toont de maatschappelijke kostenbatenanalyse bij gebruik van PV aangevuld met elektriciteit van het net en een uitgebreide vloot waterstofvoertuigen. De totale waterstofproductie is 157.600 kg per jaar, de totale vraag van de voertuigen is 156.900 kg. Bijna alle waterstof wordt dus gebruikt voor de voertuigen. Bij gebruikmaking van tubetrailers met een capaciteit van 300 kg resulteert dit in circa 525 transporten.

Resato geeft aan dat een tankstation met extra compressie in staat is om iedere 15 minuten een vrachtwagen met een tank van 15 kg te vullen. Voor 39 vrachtwagens moet er dus 10 uur worden getankt. Voor wat betreft de capaciteit is dit goed mogelijk, logistiek kan dit een probleem zijn. Indien alle vrachtwagens 's ochtends met een volle tank moeten kunnen wegrijden, ontstaat er aan het einde van de dag een grote vloot die moet tanken.

Kosten		Baten	
CAPEX			
PV	€ 470.698	Vermeden brandstofkosten	€ 3.066.334
Electrolyser	€ 1.343.526	Vermeden CO2-uitstoot	€ 618.148
Vervanging stack	€ 685.468	Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 6.285.264
Compressor	€ 157.239	Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 425.319
Tube trailer	€ 177.603	Opbrengst waterstof	€ -16.220
Opslag	€ -	Onderhoud vrachtwagens	€ 3.756.268
Tankstation	€ 1.585.029	Onderhoud bestelbussen	€ 175.492
Vrachtwagens	€ 26.190.098		
Bestelbussen	€ 2.013.175		
			€ 14.310.605
	€ 32.622.835		
OPEX			
Elektriciteit voor productie H2	€ 3.672.347		
Transportkosten netwerk	€ 493.088		
Kosten GVO	€ 159.061		
Compressie	€ 266.007		
transport	€ 575.696		
Chauffeur	€ 787.084		
Elektriciteit tankstation	€ 148.251		
Onderhoud:	€ -		
PV	€ 61.926		
Electrolyser	€ 657.624		
Compressor	€ 68.936		
Tube trailer	€ 32.881		
Tankstation	€ 975.476		
Vrachtwagens	€ 3.756.268		
Bestelbussen	€ 175.492		
	€ 11.830.137	NPV	€ 30.142.368
Totaal	€ 44.452.973	Totaal	€ 44.452.973

Tabel 26 MKBA bij gebruik van PV en elektriciteitsnet en een uitgebreide vloot.

Het scenario waarbij de elektrolyser wordt gebruikt om zoveel mogelijk waterstof te produceren en waarbij wordt uitgegaan van 8 bestelbussen en 39 vrachtwagens zodat er voldoende waterstofvoertuigen zijn om de productie af te nemen resulteert in een negatieve netto contante waarde van ruim € 30 miljoen. De uitbreiding van de vloot veroorzaakt hoge kosten en is de voornaamste oorzaak van het hogere negatieve resultaat. Het is daarom interessant om te analyseren wat de schaalvergroting aan relatieve gevolgen heeft.

Levelised cost of hydrogen (LCOH)

De berekening van de LCOH is gebaseerd op een vergelijking waarbij de netto contante waarde van de opbrengsten gelijk is aan de netto contante waarde van de kosten (56). De LCOH is het tarief voor de waterstof waarmee de producent alle kosten van het project terugverdiend inclusief een vergoeding voor het geïnvesteerde kapitaal.

$$\sum_{t=0}^{15} Ph2kg * H2kg * (1+r)^{-t} = \sum_{t=0}^{15} (Capital_t + O\&M_t + Electricity_t - RV_t) * (1+r)^{-t} \quad (1)$$

- Ph2kg = De constante vergoeding P per kg waterstof;
- H2kg = De hoeveelheid geproduceerde waterstof per jaar in kg;
- (1+r)^{-t} = De discontovoet voor de kosten van kapitaal;
- Capital_t = Totale kapitaal kosten in jaar t;

- O&M_t = De operationele en onderhoudskosten in jaar t;
 Electricity_t = De elektriciteitskosten in jaar t;
 RV_t = De restwaarde in jaar t.

Vergelijking (1) stelt de netto contante waarde van de opbrengsten van het project gelijk aan de netto contante waarde van de kosten, uitgaande van een vergoeding gelijk aan Ph2kg.

Omdat Ph2kg constant is gedurende de looptijd kan het buiten de sommatie worden gebracht. Vergelijking (1) kan zodoende worden herschreven naar:

$$LCOH = Ph2kg = \frac{\sum_{t=0}^{15} (Capital_t + O\&M_t + Electricity_t - RV_t) * (1 + r)^{-t}}{H2kg * (1 + r)^{-t}} \quad (2)$$

Vergelijking (2) wordt gebruikt om de Levelised cost of hydrogen te berekenen. De LCOH is de gemiddelde kosten per kilo waterstof gebaseerd op de investeringen, onderhoudskosten, operationele kosten, elektriciteitskosten en restwaarde. De International Energy Agency geeft nog een specifieke toelichting op het feit dat in vergelijking (2) het lijkt alsof de jaarlijkse productie van waterstof in kilo's wordt verdisconteerd. Vergelijking (1) laat echter zien dat dit wordt veroorzaakt door het feit dat er is uitgegaan van de waarde van de geproduceerde kilo's waterstof. Het is deze waarde die wordt verdisconteerd en niet de productie zelf.

Tabel 27 toont dat de LCOH sterk verschilt per scenario. De productiekosten zijn aanmerkelijk hoger indien er alleen gebruik wordt gemaakt van zonne-energie. De vaste kosten van de electrolyser verhogen in dat geval de productiekosten per kg vanwege het lage aantal operationele uren. Voor het tweede scenario waarbij gebruik wordt gemaakt van zonne-energie en ook wordt ingekocht via het net dalen de productiekosten. Omdat er sprake is van een beperkte vloot blijven de kosten van het tankstation hoog. Ook in dit geval zorgen de vaste kosten van het tankstation voor de hoge kosten per kilo waterstof omdat het tankstation weinig wordt benut. Bij gebruik van het net en een uitgebreide vloot komt het H2Grow project uit op een LCOH van € 8,24.

Het is interessant om te analyseren hoe de kosten van de waterstofproductie en -distributie zijn verdeeld. Tabel 27 laat zien dat de productie het grootste deel van de kosten veroorzaakt. Het gaat hierbij om de elektriciteit (PV en net) en om de elektrolyse. Van de distributie vormt het tankstation per kg de grootste kostenpost.

	Alleen PV Beperkte vloot	PV en net Beperkte vloot	PV en net Uitgebreide vloot
	Kosten in €/kg	Kosten in €/kg	Kosten in €/kg
Productie	€ 11,19	€ 5,05	€ 5,05
Compressie	€ 1,17	€ 0,33	€ 0,33
Transport	€ 1,99	€ 1,99	€ 1,04
Tankstation	€ 13,03	€ 13,03	€ 1,81
LCOH (€/kg)	€ 27,38	€ 20,40	€ 8,24

Tabel 27 De onderverdeling van de LCOH bij drie verschillende scenario's in euro's per kg.

Een onderzoek van de International Council on Clean Transportation (ICCT) vergelijkt een grote hoeveelheid configuraties van waterstofproductie en -distributie (34). De mediane prijs van waterstof in de EU in 2020 bedraagt volgens dit onderzoek € 11,91 en de minimum prijs € 4,39 (€ 1 = \$ 1,10). De minimumprijs is dus alleen te realiseren bij een optimale configuratie met bijvoorbeeld gunstige omstandigheden voor hernieuwbare energieproductie en lage netwerkkosten. De € 8,24/kg uit dit onderzoek wijkt niet sterk af van het onderzoek van de ICCT.

Bloomberg schat in hun Hydrogen Economy Outlook van 2020 de huidige kosten van groene waterstof op € 2,27 - € 4,09. Bloomberg vermeldt hierbij dat er wordt uitgegaan van grootschalige productie en van een optimistische inschatting van de CAPEX kosten (57). Dit lijkt ook te verklaren waarom Bloomberg uitkomt op een lagere kostprijs dan dit onderzoek.

Total cost of ownership (TCO)

Bij het opstellen van een kosten-batenanalyse is het gebruikelijk om de netto contante waarde van een project te gebruiken om de haalbaarheid van het project te beoordelen. Er zijn echter ook nog andere manieren om – met gebruikmaking van dezelfde gegevens- de resultaten in uit te drukken.

De TCO betreft de totale kosten van het rijden van een vrachtwagen of bestelbus. Dit kan worden uitgedrukt voor de looptijd van een project, per jaar of per kilometer. Tabel 28 toont alle kosten die deel uitmaken van de TCO in dit onderzoek. Het betreft alle onderdelen uit de leveringsketen zoals deze eerder besproken zijn. Voor vergelijking met andere bronnen is het belangrijk om op te merken dat de chauffeurskosten van de vrachtauto of bestelbus niet is meegenomen in dit model.

Capex	Opex	Onderhoud
PV	Elektriciteit voor produktie H2	PV-park
Electrolyser	Transportkosten netwerk	Electrolyser
Vervanging stack	Kosten GVO	Compressor
Compressor	Compressie	Tube trailer
Tube trailer	transport	Tankstation
Opslag	Chauffeur tubetrailer	Vrachtwagens
Tankstation	Elektriciteit tankstation	Bestelbus
Vrachtwagens		
Bestelbussen		

Tabel 28 Kosten die deel uitmaken van de Total Cost of Ownership.

Om de kosten van de infrastructuur te verdelen over de vrachtwagens en de bestelbussen wordt gerekend met de LCOH. De TCO van een voertuig bestaat daarmee uit de kosten van aanschaf en onderhoud van het voertuig en uit de kosten van de verbruikte waterstof. Alle overige kosten zoals genoemd in Tabel 28 komen tot uitdrukking in de LCOH.

De berekening van de TCO per voertuig voor 15 jaar, de TCO per voertuig per jaar en de Levelised Cost Of Driving (LCOD) per voertuig per km wordt gedaan volgens de formules (3), (4) en (5). De resultaten worden getoond in Tabel 29.

$$TCO_{15 \text{ jaar}} = \frac{\sum_{t=0}^{t=15} (CV_t * (1+r)^{-t} + NV_t * WD_t * DVV_t * LCOH)}{NV_t} \quad (3)$$

$$TCO_{\text{jaar}} = \frac{\sum_{t=0}^{t=15} (CV_t * (1+r)^{-t} + NV_t * WD_t * DVV_t * LCOH)}{NV_t * 15} \quad (4)$$

$$LCOD_{km} = \frac{\sum_{t=0}^{15} (CV_t * (1+r)^{-t} + NV_t * WD_t * DVV_t * LCOH)}{\sum_{t=1}^{15} NV_t * WD_t * DVV_t * EFF_t * (1+r)^{-t}} \quad (5)$$

- CV_t = Kapitaal Voertuigen;
 $(1+r)^{-t}$ = De discontovoet voor de kosten van kapitaal;
 NV_t = Aantal Voertuigen;
 WD_t = Werkzame Dagen (per jaar);
 DV_t = Dagelijks Verbruik Voertuig;
 $LCOH$ = Levelised Cost Of Hydrogen;
 EFF_t = Voertuig efficiëntie in km per kg H₂;
 $LCOD_{km}$ = Levelised Cost Of Driving per km.

Zoals op basis van het verschil van de LCOH bij de drie scenario's al mocht worden verwacht, zijn de TCO en de LCOD het hoogst bij het gebruiken van uitsluitend zonne-energie en een beperkte vloot. Het uitbreiden naar netenergie en het uitbreiden van de vloot verbeteren de TCO en de LCOD. De verbetering is beperkt omdat de vaste kosten van de waterstofvoertuigen een belangrijk deel uitmaken van de totale kosten. Betere benutting van de electrolyser en het tankstation hebben geen effect op de vaste voertuigkosten maar uitsluitend op de variabele. In de gevoeligheidsanalyse zal dit verder worden onderzocht.

		Alleen PV Beperkte vloot	PV en net Beperkte vloot	PV en net Uitgebreide vloot
TCO	Vrachtwagen (€/jr)	€ 131.090	€ 99.740	€ 73.415
	Bestelbus (€/jr)	€ 28.257	€ 23.450	€ 19.414
	Vrachtwagen (€/15 jr)	€ 1.966.347	€ 1.496.097	€ 1.101.224
	Bestelbus (€/15 jr)	€ 423.856	€ 351.751	€ 291.203
LCOD	Vrachtwagen (€/km)	€ 4,15	€ 3,16	€ 2,33
	Bestelbus (€/km)	€ 1,72	€ 1,43	€ 1,18

Tabel 29 TCO en LCOD voor vrachtwagen en bestelbus bij verschillende scenario's.

Variatie in stroomprijs en peak shaving

Tot dusverre is bij de productie van waterstof in dit onderzoek gebruik gemaakt van de PV installatie of van de PV installatie aangevuld met elektriciteit van het net. In het laatste geval is er steeds zoveel stroom ingekocht zodat de electrolyser volledig kan worden benut hetgeen resulteert in een maximale productie. Dit betekent dat er geen rekening is gehouden met de variatie in de stroomprijs. Het is mogelijk dat door op de duurste uren geen stroom in te kopen (peak shaving) de gemiddelde kosten van de geproduceerde waterstof zal dalen.

Max. elektriciteitsprijs	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Productie	113.163	123.225	142.065	152.428	155.854	156.934	157.339	157.557	157.588	157.606
kostprijs/kg	15,97	10,76	7,53	6,09	5,67	5,54	5,50	5,49657	5,49996	5,50008
Variabele kosten/kg	1,98	2,77	2,94	3,04	3,08	3,10	3,10	3,11	3,11	3,11

Tabel 30 De kosten per kg waterstof en de totale productie gerelateerd aan een maximale inkoopprijs per MWh.

Uit Tabel 30 blijkt dat het vermijden van de pieken in de stroomprijs inderdaad een zeer kleine invloed heeft op de gemiddelde kostprijs per kg waterstof. Door bijvoorbeeld een maximumprijs in te stellen van € 130 per MWh worden er enkele kilo's minder waterstof geproduceerd. De kostprijs per kg waterstof zakt een fractie, bij afronding op twee decimalen zou het verschil niet zichtbaar zijn.

Door een lagere maximumprijs per MWh te hanteren wordt er vaker geen stroom ingekocht. De totale productie daalt hierdoor en de kostprijs per kg waterstof begint te stijgen. De oorzaak is dat de vaste kosten over een kleiner volume moet worden verdeeld. De variabele kosten blijven dalen, deze bestaan voornamelijk uit de elektriciteitskosten dus goedkopere stroom resulteert in lagere variabele kosten. De conclusie luidt dat het optimaliseren van het aantal operationele uren van de elektrolyser resulteert in de laagste kostprijs per kg waterstof. De elektrolyser beperkt inzetten wanneer de stroomprijzen laag zijn leidt niet tot lagere kosten per kg. Dit staat haaks op de visie dat de productie van waterstof vooral met overschotten van (zon- en wind)elektriciteit moet worden gedaan. Door alleen overschotten te gebruiken zal het aantal operationele uren laag zijn en de kosten van de geproduceerde waterstof hoog.

In het volgende hoofdstuk zal nader in worden gegaan op de impact die de diverse veronderstellingen uit het tot nu toe besproken model hebben op de resultaten van de maatschappelijke kosten baten analyse.

9. Gevoeligheidsanalyse

In dit hoofdstuk zal een gevoeligheidsanalyse worden gedaan. De resultaten van een maatschappelijke kostenbatenanalyse zijn omgeven met onzekerheden. Drie soorten onzekerheid die kunnen worden onderscheiden zijn (5):

1. Kennisonzekerheid. Voor de belangrijkste parameters moet op basis van onderzoek worden ingeschat hoe deze zich in de toekomst zouden kunnen ontwikkelen. Vervolgens kan worden berekend welk effect deze veranderingen op de uitkomst van de MKBA hebben.
2. Beleidsonzekerheid. Veranderingen van beleid kunnen de uitkomsten van de MKBA beïnvloeden. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld het beleid op het gebied van uitstootnormen of vergunningverlening.
3. Discontovoet. De discontovoet vertegenwoordigt een risico-opslag. Door de discontovoet te variëren wordt duidelijk in welke mate de inschatting van de hoogte van het risico de uitkomst van de MKBA beïnvloedt.

De gevoeligheidsanalyse zal betrekking hebben op de situatie waarbij wordt uitgegaan van een maximale waterstofproductie (pv en net) en een uitgebreide vloot waterstofvoertuigen. Er is immers uit de analyse tot dusverre gebleken dat voor de laagste kostprijs per kg gekozen moet worden voor zoveel mogelijk operationele uren. Het spreiden van de vaste kosten weegt zwaarder dan het vermijden van dure elektriciteitspieken. Het uitgaan van een uitgebreide vloot voertuigen past bij het karakter van een MKBA bij een pilot project. Een tankstation zal in de praktijk niet bedoeld zijn voor een klein aantal voertuigen, de vraag die moet worden beantwoord is wat de kosten van mobiliteit met waterstof zijn bij een uitgebalanceerde keten.

In deze gevoeligheidsanalyse zullen de volgende parameters worden onderzocht:

- de kosten en efficiency van de elektrolyser;
- de kosten van het tankstation;
- de kosten van de voertuigen;
- de kosten van elektriciteit;
- de baten van de vermeden dieselkosten;
- de baten van de vermeden CO₂ kosten.

Voor iedere parameter zal worden besproken wat de huidige verwachtingen zijn betreffende de toekomstige ontwikkelingen. Op basis van deze informatie zullen de effecten op de MKBA worden berekend.

Elektrolyser

De International Energy Agency beschrijft in de rapporten *The future of hydrogen* en de *Global Hydrogen Review 2021* de verwachte kosten, efficiency en levensduur van de elektrolyser (58) (38). De rapporten zijn een synthese van andere onderzoeken die daarom niet apart worden besproken.

	2020	2030	Lange termijn
CAPEX (€/kw) (€ 1 = \$ 1,12)	1000 - 1600	400 - 1300	200 - 800
Efficiency (% low heating value)	56 – 60	63 – 68	67 - 74
Levensduur stack (operationele uren)	30.000 – 90.000	60.000 – 90.000	100.000-150.000

Tabel 31 Verwachte ontwikkeling van technische en economische eigenschappen van de elektrolyser.

Uit Tabel 31 blijkt dat er nog een sterke ontwikkeling van de electrolyser wordt verwacht. De technologie zal naar verwachting efficiënter worden, langer meegaan en dit tegen lagere kosten. De Department Of Energy (DOE) publiceert in *Hydrogen production cost from PEM electrolysis* vergelijkbare schattingen (59). De CAPEX van PEM elektrolyse bedragen volgens dit rapport in 2020 1.300 €/kw en de DOE verwacht een daling in 2035 naar € 900/kw.

Bij het opstellen van de MKBA is uitgegaan van € 1.500/kw als CAPEX voor de electrolyser en een efficiency van 60%. Gegeven de mogelijke ontwikkeling van de technische en economische eigenschappen van de elektrolyser is het mogelijke effect hiervan op de netto waarde van het project onderzocht.

Efficiency In %.	Kosten electrolyser in €/kw								
	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
66	€ 28,2	€ 28,3	€ 28,4	€ 28,6	€ 28,7	€ 28,8	€ 28,9	€ 29,0	€ 29,2
64	€ 28,5	€ 28,6	€ 28,7	€ 28,9	€ 29,0	€ 29,1	€ 29,2	€ 29,3	€ 29,5
62	€ 28,8	€ 28,9	€ 29,0	€ 29,2	€ 29,3	€ 29,4	€ 29,5	€ 29,7	€ 29,8
60	€ 29,1	€ 29,2	€ 29,3	€ 29,5	€ 29,6	€ 29,7	€ 29,9	€ 30,0	€ 30,1
58	€ 29,4	€ 29,5	€ 29,7	€ 29,8	€ 30,0	€ 30,1	€ 30,2	€ 30,4	€ 30,5
56	€ 29,7	€ 29,9	€ 30,0	€ 30,2	€ 30,3	€ 30,5	€ 30,6	€ 30,7	€ 30,9

Tabel 32 Netto contante waarde project (in mln €) bij verschillende kosten en efficiency van de electrolyser.

Tabel 32 laat zien dat een verbeterde efficiency en een reductie in de kosten van de electrolyser leidt tot een kleine verbetering van de NCW van het project. Dankzij de verbeterde efficiency wordt er bovendien meer waterstof geproduceerd en verkocht. Het is daarom goed om ook naar de ontwikkeling van de LCOH te kijken.

Efficiency In %.	Kosten electrolyser in €/kw								
	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
66	€ 7,12	€ 7,21	€ 7,29	€ 7,37	€ 7,45	€ 7,53	€ 7,61	€ 7,69	€ 7,77
64	€ 7,25	€ 7,34	€ 7,42	€ 7,50	€ 7,59	€ 7,67	€ 7,75	€ 7,84	€ 7,92
62	€ 7,39	€ 7,47	€ 7,56	€ 7,65	€ 7,73	€ 7,82	€ 7,91	€ 7,99	€ 8,08
60	€ 7,53	€ 7,62	€ 7,71	€ 7,80	€ 7,89	€ 7,98	€ 8,07	€ 8,16	€ 8,25
58	€ 7,69	€ 7,78	€ 7,87	€ 7,96	€ 8,06	€ 8,15	€ 8,24	€ 8,33	€ 8,42
56	€ 7,85	€ 7,95	€ 8,04	€ 8,14	€ 8,23	€ 8,33	€ 8,43	€ 8,52	€ 8,62

Tabel 33 LCOH bij verschillende kosten en efficiency van de electrolyser.

Tabel 33 toont de LCOH bij verschillende kosten en efficiency van de electrolyser. Verlaging van CAPEX en verbetering van efficiency leiden zoals verwacht tot een daling van de LCOH. De uitgangspunten van het H2Grow project zijn capex kosten van de electrolyser van € 1.500 en een efficiency van 60%. Volgens de genoemde literatuur is vanaf 2030 een daling naar € 800 respectievelijk 66% mogelijk. Dit zou de LCOH van € 8,25 doen dalen naar € 7,21.

Voertuigen

De kosten van de voertuigen vormen een groot deel van de totale projectkosten. Omdat er nog weinig waterstofvoertuigen op de markt zijn worden diesel bestelbussen en vrachtwagens omgebouwd tot waterstofvoertuigen. Op basis van de offertes in het H2Grow-projectplan zijn de tot nu toe gehanteerde kosten voor een bestelbus € 142.000 (aanschaf € 30.000 en ombouw € 112.000) en voor een vrachtwagen € 437.525 (aanschaf € 105.000 en ombouw € 332.525). De aanschafprijzen zijn de prijzen van reguliere dieselveertuigen, de waterstofvoertuigen zijn dus ruim vier keer zo duur.

Diverse producenten brengen momenteel een waterstof-elektrisch aangedreven truck op de markt. Voorbeelden zijn de HDC-6 Neptune van Hyundai¹², de Nikola Tre van Nikola¹³ en de op de Mirai gebaseerde truck van Toyota en Hino Motors¹⁴. Prijzen van deze trucks zijn nog niet bekend. De Hydrogen Council schat de kosten van een waterstof truck in 2020 als drie keer dat van een vergelijkbaar diesel voertuig (60). In 2030 wordt verwacht dat de extra kosten nog 1,2 keer zo hoog zijn. Een waterstof truck is volgens die verwachting dan dus nog 20% duurder dan een diesel. De kostendaling wordt voornamelijk veroorzaakt door lagere kosten van de brandstofcel (70% – 80% daling) en de waterstoftank (60%). Deze daling is te danken aan schaalvoordelen, hierbij wordt een jaarlijkse productie van 150.000 trucks verondersteld in 2030.

Jaar	2020	2022	2024	2026	2028	2030
Kostprijs truck	€ 420.000	€ 361.200	€ 302.400	€ 243.600	€ 184.800	€ 126.000
NCW (€ mln)	-€ 29,09	-€ 25,57	-€ 22,05	-€ 18,53	-€ 15,01	-€ 11,49
LCOD (€/km)	€ 2,27	€ 2,07	€ 1,88	€ 1,68	€ 1,49	€ 1,29

Tabel 34 Netto contante waarde in miljoenen euro's bij verschillende kostprijzen van een waterstoftruck.

Tabel 34 laat de netto contante waarde van het project zien bij verschillende kostprijzen van een waterstof aangedreven truck. Er wordt verondersteld dat de kostendaling lineair plaats zal vinden. Omdat de voertuigen een groot deel uitmaken van de investeringen en omdat de verwachte kostendaling groot is, wordt de netto contante waarde van het project aanzienlijk minder negatief. Aan de ontwikkeling van de LCOD is te zien dat de verwachte kosten per kilometer sterk samenhangen met de (verwachte) aanschafkosten van de vrachtwagen.

Ook voor andere typen voertuigen worden kostenverlagingen verwacht. Het H2Bus consortium heeft als doelstelling om waterstofbussen te verkopen voor € 375.000 per stuk met ingang van 2021¹⁵.

Tankstation

Voor het projectalternatief is voor de kosten van het tankstation uitgegaan van een offerte van Resato. De investering bedraagt € 1,1 mln en de levensduur is 10 jaar. Het tankstation verbruikt 3 Kwh elektriciteit per kg waterstof en de jaarlijkse onderhoudskosten zijn € 89.000. In de literatuur schat de IEA de kosten voor een tankstation van 700 bar op \$ 0,6 – 2 mln en voor 350 bar op \$ 0,15 – 1,6 mln (58). De lage schatting betreft een capaciteit van 50 kg per dag, de hoge schatting 1.300 kg per dag. Een toepassing van deze gegevens op het tankstation dat nodig is voor de casus in deze studie zou resulteren in een schatting van \$ 0,7 mln (of € 0,63 mln) voor de investering. Viktorsson schat de kosten van een tankstation op € 0,73 mln waarbij de diverse componenten van het tankstation apart zijn geraamd (61). Dit tankstation gaat echter uit van 1 dispenser met een druk van 300 bar. De Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) gaat uit van € 0,75 mln voor een 350 bar tankstation en € 1,5 mln voor een 700 bar tankstation (29). In algemene zin lijkt de investering van € 1,1 mln aan de hoge kant. Indien in de toekomst schaalvoordelen kunnen worden gerealiseerd bij het bouwen van tankstations leidt ook dat mogelijkerwijs tot kostenverlagingen.

¹² <https://hyundai-pers.nl/hyundai-presenteert-concept-emissievrije-truck-met-brandstofcel/>

¹³ <https://nikolamotor.com/tre#motor-performance>

¹⁴ <https://www.toyota.nl/over-toyota/toyota-world/Toyota-ontwikkelt-vrachtwagen-op-waterstof.json>

¹⁵ <https://h2bus.eu/offering.html>

Investering tankstation	€ 1.100.000	€ 1.000.000	€ 900.000	€ 800.000	€ 700.000	€ 600.000
NCW	-€ 29,98	-€ 29,76	-€ 29,55	-€ 29,33	-€ 29,11	-€ 28,89

Tabel 35 Netto contante waarde in miljoenen euro's van het project bij verschillende investeringskosten voor een waterstof-tankstation.

Tabel 35 toont de netto contante waarde van het project bij verschillende investeringskosten van een tankstation. De contante waarde daalt iets sneller dan de investeringskosten. Dit komt door de levensduur van het tankstation. Gedurende de 15 jarige looptijd van het project wordt na 10 jaar opnieuw geïnvesteerd in het tankstation. Een kostendaling heeft dus effect op de initiële investeringskosten en op de herinvesteringskosten na 10 jaar. Concluderend kan worden gesteld dat een daling van de kosten van het tankstation een beperkte positieve invloed heeft op de netto contante waarde van het project.

Elektriciteitskosten

Voor het bepalen van de elektriciteitskosten bij de productie van waterstof is tot nu toe uitgegaan van de elektriciteitsprijsontwikkeling zoals verwacht door het ECN in de klimaat- en energieverkenning 2021. ECN baseert zich daarbij op de onder- en bovenmarge van de verwachte kolen-, gas- en CO₂-prijzen uit hetzelfde onderzoek. Er is een brede onzekerheidsmarge waarbij de elektriciteitsprijs kan stijgen naar gemiddeld € 70 per MWh in 2030 of juist blijvend laag blijven rond de € 32 (62). Voor het project Integrale Infrastructuur verkenning 2030-2050 zijn klimaatneutrale energiescenario's onderzocht (63). Ook uit dit onderzoek blijkt de onzekerheid betreffende de toekomstige elektriciteitsprijs. Het onderzoek resulteert niet in een voorspelde prijsontwikkeling maar raamt bijvoorbeeld wel de verwachte kosten van geïmporteerde elektriciteit in 2050 tussen de € 25 en € 100 per MWh. In een doorrekening van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) van de effecten van het ontwerp klimaatakkoord verwacht het PBL een elektriciteitsprijs in 2030 van € 52 in 2030 (64).

De geo-politieke ontwikkelingen in 2022 hebben geleid tot een sterke prijsstijging. De gemiddelde elektriciteitsprijs per MWh in de eerste helft van 2022 op de day ahead markt bedraagt € 284,32. Voor de gevoeligheidsanalyse wordt verondersteld dat de elektriciteitsprijs op de langere termijn maximaal € 200 zal bedragen.

Elektriciteitsprijs (€/MWh)	€ 25	€ 50	€ 75	€ 100	€ 125	€ 150	€ 175	€ 200
LCOH (€/kg)	€ 6,82	€ 8,13	€ 9,45	€ 10,76	€ 12,07	€ 13,38	€ 14,69	€ 16,00
LCOD (€/km)	€ 2,21	€ 2,32	€ 2,42	€ 2,53	€ 2,63	€ 2,74	€ 2,84	€ 2,95

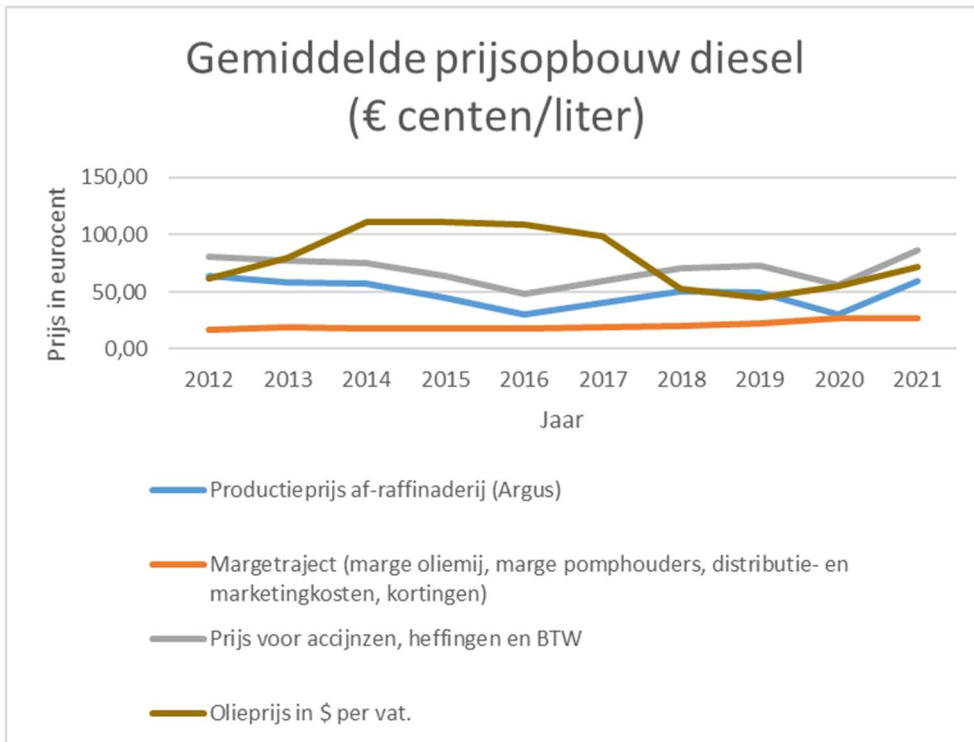
Tabel 36 De netto contante waarde in miljoenen euro's bij verschillende elektriciteitsprijzen (in €/MWh).

Uit Tabel 36 blijkt dat de elektriciteitsprijs een sterk effect heeft op de LCOH. Voor de productie van waterstof vormen de elektriciteitskosten een belangrijk deel van de totale kosten. Gezien de grote volatiliteit van de elektriciteitsprijs is het daarom van belang om bij het nemen van beslissingen zowel naar de lage als naar de hoge prijsverwachtingen te kijken. Tevens lijkt het zinvol om te onderzoeken of er mogelijkheden zijn om de prijsrisico's te verminderen door bijvoorbeeld lange termijn contracten te hanteren of door de waterstofproductie te combineren met eigen stroomproductie.

De LOCD reageert minder sterk op de elektriciteitsprijs. Zoals eerder geconstateerd heeft de aanschafprijs van het voertuig een zeer sterk effect op de kosten per kilometer, de variabele kosten spelen een minder sterke rol.

De baten van de vermeden dieselkosten.

De kosten van waterstofmobiliteit worden bepaald door de productie, opslag, distributie en het gebruik van waterstof. De waterstofvoertuigen vervangen dieselveertuigen waardoor de vermeden uitgaven voor dieselbrandstof als baten voor het project worden gezien. De hoogte van deze baten is afhankelijk van de dieselprijs.



Figuur 8 Ontwikkeling van de dieselprijs in componenten.

Figuur 8 toont de ontwikkeling van de diverse componenten van de dieselprijs. De voor deze MKBA relevante besparingen betreffen de prijs vóór accijnzen, heffingen en BTW. Deze prijs vertoont hetzelfde verloop als de zogeheten productieprijs af-raffinaderij – die gezien kan worden als de prijs van de diesel zelf na de raffinage – en de dieselprijs aan de pomp exclusief BTW. De olieprijs in \$ per vat laat echter een grotere volatiliteit zien. Stijgingen en dalingen van de olieprijs zijn niet in dezelfde mate aan te treffen in de raffinaderijprijs en de pompprijs. De voorspelde olieprijs per vat is dus niet per definitie een geschikte indicator van de verwachte dieselprijs. De olieprijs wordt bepaald door een complex van factoren waaronder de verwachtingen en de (speculatieve) handel (65). Deze factoren werken niet allemaal in dezelfde mate door op de dieselprijs aan de pomp.

De olieprijs in dollars per vat heeft sinds 2012 geschommeld tussen 45 en 112 dollar. Ervan uitgaande dat op de langere termijn de olieprijs en de prijs aan de pomp dezelfde ontwikkeling doormaken wordt voor de gevoeligheidsanalyse onderzocht welk effect de olieprijs heeft op de NCW.

Olieprijs (\$/vat)	\$40	\$50	\$60	\$70	\$80	\$90	\$100	\$110	\$120	\$130	\$140
NCW (€ mln)	-31,8	-31,4	-31,1	-30,7	-30,3	-30,0	-29,6	-29,3	-28,9	-28,5	-28,2

Tabel 37 Netto contante waarde in mln euro's bij verschillende dieselprijzen vóór accijnzen, heffingen en BTW (in € cnt per liter).

Tabel 37 toont de netto contante waarde van het project bij verschillende olieprijsen. Een hogere olieprijs leidt tot een grotere besparing van brandstofkosten. De NCW verbetert daarom naarmate de olieprijs stijgt. De dieselprijs heeft een duidelijke invloed op het project. Er moet worden benadrukt dat de prijzen uit Tabel 37 in het model zijn gebruikt als een constante prijs voor de hele projectperiode van 15 jaar. Gezien de volatiliteit van de dieselprijs lijkt het waarschijnlijk dat de gemiddelde prijs van deze periode zich rond de middelste waarden zal bevinden. Een gemiddelde olieprijs van 40 of 140 dollar per vat zou een permanent lage of hoge olieprijs voor een periode van 15 jaar impliceren.

Resultaten bij lagere capex als gevolg van doorontwikkeling technologie.

Naar aanleiding van de resultaten zoals besproken in de gevoeligheidsanalyse kan worden onderzocht wat de gevolgen kunnen zijn van verdere technologische ontwikkeling. Van de electrolyser wordt verwacht dat deze een kostendaling en een efficiency verbetering zal laten zien vanwege de schaalvoordelen bij grotere productieaantallen en de ontwikkelfase waarin de technologie zich nog bevindt. Voor wat betreft de voertuigen (de grootste investering) kan ook worden verwacht dat seriereproductie en technologische ontwikkeling zullen leiden tot kostendaling. In lijn met de Hydrogen Council wordt als uitgangspunt genomen dat op de lange termijn en bij grootschalige ontwikkeling een waterstofvoertuig 20% duurder zal zijn dan een dieselveertuig (60). Voor de electrolyser worden capex kosten van € 800/kw en een efficiency van 67% verondersteld gebaseerd op informatie van de IEA (36).

		Huidige kosten	Projectie met sterke kostendaling	Projectie met medium kostendaling
CAPEX	Vrachtwagen (€)	€ 437.525	€ 126.000	€ 250.000
	Bestelbus (€)	€ 142.000	€36.000	€80.000
	Electrolyser (€/kw)	€ 1.500	€ 800	€ 800
	Electrolyser efficiency (%)	60	67	67
TCO	Vrachtwagen (€/jr)	€ 73.415	€ 36.914	€ 49.937
	Bestelbus (€/jr)	€ 19.414	€ 7.701	€ 12.322
LCOD	Vrachtwagen (€/km)	€ 2,33	€ 1,17	€ 1,58
	Bestelbus (€/km)	€ 1,18	€ 0,47	€ 0,75

Tabel 38 TCO en LCOD bij de huidige en bij de geprojecteerde kosten van voertuigen en electrolyser.

Tabel 38 toont de TCO en de LCOD van een vrachtwagen en een bestelbus bij de huidige en de geprojecteerde kosten van het voertuig en de electrolyser. Het is duidelijk te zien dat de verwachte kostendaling van met name de voertuigen zal leiden tot een sterke daling van de TCO en van de LCOD. Uiteraard zijn de kostendalingen gebaseerd op verwachtingen en zijn daarom onzeker. De door de Hydrogen council verwachte kostendaling is gebaseerd op een jaarlijkse productie van 150.000 trucks in 2030. Andere bronnen noemen voor 2030 als verwachte kosten voor een waterstofvrachtwagen \$ 157.100 - \$ 258.000 (66) (67) (50). Uiteraard leiden deze hogere kosten tot een hogere TCO en LCOD.

10. Niet-kwantificeerbare kosten en baten

In dit onderzoek zijn tot nu toe alleen kwantificeerbare kosten en baten besproken. Weliswaar waren deze in eerste instantie niet allemaal monetair van aard maar bijvoorbeeld de CO2 effecten kunnen kwantitatief worden geschat en door het doen van aannames vervolgens worden gemonetariseerd. De ontwikkeling van waterstof in de mobiliteitssector kent echter ook een aantal niet-kwantificeerbare kosten en baten. Deze moeten in een MKBA worden besproken en pro memorie worden opgenomen.

Zero-emissie zone

Op 5 oktober 2020 heeft de staatssecretaris van infrastructuur en waterstaat afspraken gepubliceerd betreffende de invoering van zero-emissie zones in 30 tot 40 grotere steden vanaf 2025 (68):

1. “Gemeenten kondigen minimaal vier jaar voor de invoering de ligging en omvang van de zero-emissiezone aan. Dit is belangrijk om vroegtijdig aan iedereen duidelijkheid te geven.
2. Alle nieuwe bestel- en vrachtauto's die vanaf 1 januari 2025 op kenteken worden gezet moeten zero-emissie aan de uitlaat zijn om de zero-emissiezone voor stadslogistiek in te mogen.
3. Alle bestel- en vrachtauto's die rondrijden in de zero-emissiezone moeten vanaf 1 januari 2030 zero-emissie zijn.”

De afspraken zijn een uitwerking van een onderdeel van het Klimaatakkoord. In de brief van de staatssecretaris aan de tweede kamer wordt verder de overgangsregeling voor voertuigen van vóór 2025 voor de periode 2025 – 2030 toegelicht:

1. “Euro VI-vrachtwagens die op 1 januari 2025 maximaal 5 jaar oud zijn (bakwagens) respectievelijk maximaal 8 jaar oud zijn (trekkeropleggercombinatie) uiterlijk tot 1 januari 2030 de zone in mogen rijden.
2. Plug-in hybride vrachtauto's hebben tijdelijk, tot 1 januari 2030, toegang tot de zero-emissie voor stadslogistiek, als zij daar aantoonbaar en handhaafbaar emissieloos rijden.”

Een belangrijke bate voor waterstof-elektrisch rijden in vergelijking met diesel is dus de toegang tot de binnensteden in Nederland vanaf 2025 en 2030. Deze factor is moeilijk te kwantificeren. Het is onbekend hoeveel vrachtwagens nooit in de binnenstad rijden. Voor deze vrachtwagens heeft de zero-emissie zone geen gevolgen. Voor vrachtwagens die wel in de binnenstad rijden wordt in de toekomst mogelijk gebruik gemaakt van stadsdistributiecentra (69) waar vrachtwagens hun lading lossen en elektrische voertuigen de zogeheten “last mile” van de bezorging uitvoeren. Dit zijn dan extra kosten voor het nulalternatief. In deze studie wordt voor waterstof-elektrisch rijden de toekomstige toegang tot de zero-emissie zones als een positieve bate behandeld die niet is gemonetariseerd.

Vergunningen

Voor de bouw van een waterstoftankstation moet een vergunning worden aangevraagd. Het Instituut voor de veiligheid heeft een bestuurlijke handreiking geschreven betreffende de vergunningverlening voor waterstoftankstations (70). In deze handreiking wordt de relevante wet- en regelgeving voor vergunningverlening besproken en wordt er een overzicht gegeven van de volgende processtappen die bij de behandeling van een aanvraag doorlopen worden:

1. voortraject en quick scan op de (on)mogelijkheden en potentiële knelpunten;
 2. bepalen of de aanvraag ontvankelijk en vergunbaar is;
 3. verantwoording van het groepsrisico;
 4. uitwerking van voorschriften;
 5. invoer van gegevens in het risicoregister en in een risicokaart;
 6. risicocommunicatie;
 7. handhaving;
 8. (voorbereiding op) incidentbestrijding.
- (Bron (70))

In opdracht van Rijkswaterstaat is door Ekinetix B.V. een handleiding voor het vergunningsproces voor de aanvrager opgesteld (71). De leidende richtlijn die in beide handleidingen wordt besproken is de Publicatiereeks Gevaarlijke stoffen 35 (PGS 35) (72). Dit is de richtlijn waarin de regels worden gesteld die gelden voor waterstoftankstations. De regels hebben betrekking op omgevingsveiligheid, arbeidsveiligheid en brand- en rampenbestrijding. De regels hebben een wettelijke basis in respectievelijk de Omgevingswet, de Arbeidsomstandighedenwet en Warenwet en in de Wet veiligheidsregio's.

WaterstofNet heeft in opdracht van Rijkswaterstaat de vergunningsaanvragen voor waterstoftankstations in Nederland geïnventariseerd en geanalyseerd (73). Een belangrijke conclusie is dat de gemeenten in principe dezelfde procedure hanteren maar dat er afhankelijk van de specifieke omgeving soms om additionele maatregelen wordt gevraagd. Bestemmingsplanwijzigingen kunnen leiden tot zeer langdurige trajecten. De doorlooptijd van de vergunningverlening vanaf het moment van indiening tot het einde van de bezwaarprocedure varieert voor vijf operationele tankstations van 4 tot 14 maanden. In alle genoemde rapporten wordt benadrukt dat contact en overleg met de gemeente wordt aanbevolen omdat het vaak voor het eerst is dat er sprake is van een vergunningsaanvraag voor een waterstoftankstation.

De administratieve last en de doorlooptijd van de vergunningsaanvraag kunnen worden gezien als een kostenpost voor het project.

Veiligheid

De veiligheid van waterstofmobiliteit betreft de keten van productie, opslag, transport, distributie en gebruik van waterstof. Uiteraard is het H2Grow pilot project te klein om conclusies over de veiligheid van één of meerdere processtappen te trekken. Daarvoor worden er te weinig kilo's waterstof geproduceerd en te weinig kilometers gereden. Zelfs wanneer we de data van zoveel mogelijk projecten gebruiken blijft de totale omvang beperkt en moeilijk vergelijkbaar met bijvoorbeeld de veiligheid van fossiele brandstoffen. De Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH2JU) registreert waterstofincidenten en -ongelukken in de database HIAD 2.0. In deze database staan 275 incidenten en ongelukken geregistreerd die door de FCH JU zijn geanalyseerd (74). Meer dan 90 procent van deze incidenten en ongelukken hebben zich voorgedaan in een industriële omgeving omdat daar de meeste waterstof wordt geproduceerd en gebruikt.

De analyse resulteert in de volgende lessen die zijn geleerd:

- Inspectie en onderhoud

Onvoldoende inspectie en onderhoud kan leiden tot incidenten en ongelukken. De scope en frequentie van inspectie en onderhoud moeten op hoog niveau zijn. Aandachtspunten zijn de *structural integrity*, corrosie en inspectie op lekkage.

- Personeel
Goede procesinstructies kunnen fouten voorkomen. Strenge veiligheidsvoorschriften bij werkzaamheden zijn belangrijk. Training en het bevestigen van werkafspraken kunnen fouten voorkomen. Ook moeten wijzigingen in de installaties voldoende aandacht en nadruk krijgen. Bij risicovolle werkzaamheden is extra toezicht aan te raden.
- Wijzigingen in proces en/of installatie
Meerder incidenten en ongelukken resulteerden in aanpassingen van het proces of van de installatie. Voorbeelden zijn extra ventilatie, detectoren, verwijderen van apparatuur met een ontstekingsmechanisme en extra veiligheidsprocedures.

In een onderzoek naar de veiligheid van waterstofvulstations worden ongelukken in 2019 in Noorwegen en in California besproken (75). In breder verband wordt ook de veiligheid van CNG tankstations geanalyseerd. De voornaamste conclusie luidt dat lekkages de belangrijkste oorzaak zijn van de voorkomende incidenten en dat daarvoor een aantal oorzaken kunnen worden onderscheiden. In de eerste plaats moet bij de keuze van het materiaal zoals kleppen en afsluitingen voldoende rekening worden gehouden met de toepassing en de omstandigheden daarbij. Een tweede oorzaak zijn menselijke fouten bij de installatie zoals het aandraaien van moeren. Contoleren van het installatiewerk is noodzakelijk om de veiligheid te borgen. Tenslotte zijn menselijke fouten tijdens het gebruik een oorzaak van incidenten. Veiligheidsmaatregelen om deze fouten te voorkomen worden aangeraden. De auteurs concluderen verder dat - op basis van een vergelijking tussen de eigenschappen van de brandstoffen - benzine meer brand- en ontploffingsgevaar veroorzaakt dan CNG en waterstof.

Het Instituut Fysieke Veiligheid heeft een onderzoek uitgevoerd naar waterstof als brandstof voor voertuigen en naar de aandachtspunten voor incidentbestrijding (76). Uit een analyse van diverse instructies en handleidingen blijkt dat er onduidelijkheid bestaat over de meest veilige en effectieve manier om incidenten bij voertuigen op waterstof te bestrijden. Het IFV noemt het handelingsperspectief voor de brandweer niet eenduidig.

Tijdens het H2Grow project heeft er één verkeersongeval plaatsgevonden met een Volkswagen Transporter. De Volkswagen was betrokken bij een botsing met een ander voertuig en is total loss verklaard. Voor wat betreft de veiligheidsaspecten van dit waterstofvoertuig zijn de conclusies naar aanleiding van dit ongeval als volgt:

- Technisch gezien blijken de bevestigingsmaterialen van motor, tanks, accupakket en brandstofcel te voldoen.
- De electronica voor wat betreft de veiligheid van het voertuig en de brandstofcel heeft gewerkt.
- De brandweer wist ter plaatse niet hoe te handelen. Het voertuig staat in het signaleringssysteem geregistreerd als waterstofvoertuig. Omdat de auto een sissend geluid maakte vanwege het afblazen van waterstof en de brandweer niet in het systeem heeft gekeken was de brandweer terughoudend in haar handelen. Holthausen heeft ter plekke geassisteerd. Deze bevinding bevestigt de conclusies van de eerder genoemde studie van het IFV (76).
- Bij de brandweer moet expertise worden opgebouwd betreffende de omgang met waterstofvoertuigen in het geval van een ongeval.

- Omdat het voertuig total loss werd verklaard werd de verzekeringsmaatschappij na uitkering de eigenaar van het wrak. Aangezien het niet de bedoeling was dat de aanwezige waterstoftechnologie op deze wijze van eigenaar zou veranderen was hierover overleg nodig met de verzekeringsmaatschappij. Voor de overige voertuigen is dit nu bij voorbaat geregeld. Dit is ook een aanbeveling voor toekomstige pilot projecten.

In deze studie wordt het veiligheidsaspect van waterstofmobiliteit als een kostenpost beschouwd omdat in de mobiliteitsketen er extra fysieke en organisatorische maatregelen nodig zullen zijn. Waterstof wordt dus niet beschouwd als onveiliger maar veiligheid zal wel uitgaven met zich meebrengen.

Onderhoud

Voor het onderhoud van de waterstofvoertuigen is nog geen specifieke regelgeving geformuleerd voor zowel de onderhoudswerkzaamheden als voor de werkplaats. De Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 26 bevat de richtlijn voor het veilig bedrijfsmatig stallen, onderhouden en repareren van CNG en LNG motorvoertuigen (77). Het verantwoordelijke Bestuurlijke Omgevingsberaad (Bob) vermeldt bij PGS 26 dat in 2021 zal worden gestart met PGS 26 deel 2 voor waterstof. Op het moment van schrijven is dit deel 2 nog niet gepubliceerd. Aangezien de publicatiereeks volgens een vaste systematiek wordt opgesteld en waterstof als een uitbreiding wordt gezien van PGS 26 kan er al wel een beeld worden gevormd van de toekomstige PGS 26 voor waterstof.

Tabel 39 toont de scenario's die leiden tot veiligheidsrisico's zoals onderscheiden in PGS 26. Weliswaar zijn de scenario's geformuleerd voor CNG en LNG, de genoemde oorzaken en incidenten kunnen zich evengoed voordoen met een waterstofvoertuig.

Scenario	Omschrijving
S1	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig (binnen of buiten) veroorzaakt door bijvoorbeeld corrosie, of als gevolg van andere materiële oorzaken.
S2	Lekkage van een CNG/LNG-installatie door een verkeerde handeling (bij het openen).
S3	Verhitting door brand in de buurt of in of aan het CNG/LNGvoertuig.
S4	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig (binnen of buiten) of een toename van de 'boil-off' van een LNG-tank door verlies van het vacuüm, veroorzaakt door de impact van een voorwerp uit de omgeving.
S5	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig door een val van de brug.
S6	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig door het verkeerd gebruiken van de stempelbrug, waardoor de stempel onder de CNG/LNG-voertuigtank komt en de CNG/LNG-installatie beschadigd raakt.
S7	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig doordat tijdens werkzaamheden aan de CNG/LNG-installatie de CNG/LNG-installatie niet drukloos of gasvrij is.
S8	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig doordat na de uitvoering van werkzaamheden de installatie niet op lektheid is gecontroleerd.
S9	Lekkage van een CNG/LNG-voertuigtank door een tekortkoming of verkeerde handeling bij de opslag van een uitgebouwde voertuigtank terwijl deze niet gasvrij of drukloos is. De locatie waar de tanks zijn opgeslagen, is ontoegankelijk voor onbevoegden.

S10	Lekkage van de CNG/LNG-installatie van een voertuig door een onjuiste handeling bij het gecontroleerd afblazen en drukvrij maken van de CNG/LNG-installatie.
S11	Lekkage van een LNG-installatie boven een smeerkuil door bijvoorbeeld corrosie, gebrekkig onderhoud of een verkeerde handeling.
S12	Vrijkomen van methaan bij CNG-voertuigen of door 'boil-off' van LNG-voertuigen in een spuitcabine.
S13	Aanraken van een koud oppervlak van een LNG-installatie.
S14	Vrijkomen van methaan binnen in een werkplaats of stalling door 'boil-off' van een LNG-tank waardoor zich een explosief mengsel vormt dat ontsteekt.
S15	Lekkage als gevolg van een defect CNG/LNG-voertuig.

Tabel 39 Scenario's uit PGS 26 die veiligheidsrisico's veroorzaken.

Om te voorkomen dat de scenario's realiteit worden zijn er in de PGS 26 eerst doelen vastgesteld. Aan deze doelen zijn vervolgens maatregelen gekoppeld. Het voert te ver om op deze plaats alle 25 maatregelen te bespreken. In algemene zin kan worden gesteld dat de voorgeschreven maatregelen vermoedelijk op vergelijkbare wijze gaan gelden voor waterstofvoertuigen. In algemene zin zijn de maatregelen in te delen in de volgende categorieën (78):

1. Fysieke aanpassingen aan het pand (ventilatie en detectie);
2. Het opstellen of aanpassen van werkvoorschriften zodat er in de werkplaats veilig wordt gewerkt;
3. Training van de medewerkers. Voor het werken aan CNG-voertuigen bestaan erkende opleidingen, voor waterstof zijn deze nog in ontwikkeling;
4. Informeren van derden;
5. Administratie en evaluatie.

De extra benodigde aanpassingen op een locatie voor het stallen van en het verrichten van (onderhouds)werkzaamheden aan waterstofvoertuigen zal mede afhangen van de bestaande voorzieningen op de locatie. Indien de locatie reeds voldoet ook PGS 26 omdat er met CNG/LNG-voertuigen wordt gewerkt dan zullen veel maatregelen al zijn getroffen. Bij een locatie waar tot dusverre uitsluitend met diesel en benzine voertuigen wordt gewerkt zullen de noodzakelijke aanpassingen veel uitgebreider zijn. De extra kosten zullen dus mede afhangen van de bestaande situatie.

Het gaat bij de kosten van onderhoud niet alleen om de aanpassingen die moeten worden gedaan aan de werkplaatsen en aan de organisatie. De kosten zullen op lange termijn vooral worden veroorzaakt door de onderhoudswerkzaamheden zelf. De onderhoudskosten voor een diesel truck worden geschat op € 0,12/km en voor een waterstof truck op € 0,11/km (79). Hierbij wordt aangenomen dat de elektrische aandrijving lagere onderhoudskosten met zich meebrengt dan de verbrandingsmotor.

Acceptatie en weerstand

Waterstofvoertuigen en waterstoftankstations zullen door de maatschappij moeten worden geaccepteerd om een rol te gaan spelen in de mobiliteitssector. In het kader van het H2Grow-project is onderzocht of er maatschappelijke weerstand was tegen de bouw van het tankstation en naar de acceptatie van het rijden in een waterstofvoertuig door de chauffeurs.

De vestiging van het publiek toegankelijke waterstoftankstation heeft geen negatieve reacties opgeleverd. De vergunningsprocedure heeft zo'n 5 jaar geduurd doordat in overleg met de gemeente eerst gezocht is naar een geschikte locatie. Tegen de vergunningaanvraag is geen bezwaar gemaakt. Voor, tijdens en na de bouw waren er geen negatieve berichten in de pers en sociale media. Factoren die hierbij een rol gespeeld hebben:

1. de locatie is op een industrieterrein waar geen direct omwonenden zijn;
2. er zijn in Nederland al waterstoftankstations die probleemloos functioneren en waar zorgvuldig met veiligheid wordt omgegaan;
3. Groningen was een witte vlek en er is behoefte aan een landelijk dekkend net van waterstoftankstations;
4. voor waterstoftankstations is een duidelijk veiligheidskader: PGS-35;
5. in zijn algemeenheid hebben mensen weinig bezwaren tegen een tankstation (hst 7.4);
6. in 'Groningen en Ommelanden' is een positieve sfeer rond waterstof. Noord-Nederland profileert zich als hydrogeen valley. Er rijden bussen en vuilnisauto's op waterstof rond. Onderwijsinstellingen (MBO, HBO en Universiteit) richten onderwijs en onderzoekprogramma's in met waterstof. EnTranCe is een proeftuin voor gezamenlijke waterstofprojecten tussen onderwijs en bedrijfsleven. In Hoogeveen en Wagenborgen zijn experimenten om aardgas te vervangen door waterstof om huizen te verwarmen. In Winschoten is gestart met de productie van waterstofvrachtwagens. Deze initiatieven geven een gevoel van trots. Het is een succes waar mensen graag deel van uitmaken. Het biedt perspectief en nieuwe werkgelegenheid in een regio waar het einde van de aardgaswinning nadert en de expertise van (aard)gas kan worden ingezet voor (waterstof)gas.

(Bijdrage Leo Heijne).

De waterstofvoertuigen waarmee tijdens dit project is gereden werden bestuurd door zes vaste chauffeurs. Deze chauffeurs hebben een vragenlijst ingevuld betreffende hun ervaringen met het rijden en tanken van een waterstofvoertuig. Hierbij moet worden vermeld dat het nieuw gerealiseerde tankstation nog niet gereed was en dat de antwoorden betrekking hebben op het tanken van waterstof bij locatie Woldjerspoor. De resultaten van de enquête zijn te vinden in Bijlage 7.

De chauffeurs beoordelen het waterstofvoertuig in vergelijking met een diesellootvoertuig als voldoende tot goed als het gaat om de storingsgevoeligheid, het afstands bereik en het rijgedrag. In vergelijking met een batterij-elektrisch voertuig wordt het waterstofvoertuig als goed beoordeeld op deze onderdelen.

Het tanken van het waterstofvoertuig bij het oude tankstation in vergelijking met een diesellootvoertuig wordt verschillend beoordeeld, de antwoorden variëren van slecht tot goed. Het tanken van een waterstofvoertuig in vergelijking met het opladen van een batterij-elektrisch voertuig wordt beoordeeld als goed.

Samengevat wijzen de ervaringen in het waterstofproject op een goede acceptatie van het tankstation door de omgeving en zijn ook de chauffeurs positief over hun ervaringen. Dit wordt bevestigd door de antwoorden op de open vragen in de enquête. De chauffeurs vinden het belangrijk dat er een schonere manier van transport wordt ontwikkeld en zijn tevreden over het voertuig.

11. Effecten op macroniveau

Tot dusverre zijn voornamelijk de directe effecten van een hernieuwbare waterstofketen voor de sector mobiliteit besproken. Het betrof de investeringen en de exploitatiekosten enerzijds en de bespaarde uitgaven en vermeden externe effecten anderzijds. Indirecte effecten van het project zijn werkgelegenheidseffecten, het vergroten van de vraag naar schaarse materialen en effecten op de elektriciteitsinfrastructuur.

Werkgelegenheid

In het TNO-rapport Verkenning werkgelegenheidseffecten van klimaatmaatregelen (80) worden de werkgelegenheidseffecten voor Nederland besproken van de maatregelen zoals beschreven in het klimaatakkoord 2018. Ook de sector mobiliteit wordt hierin geanalyseerd. De veronderstelde grote veranderingen zijn de toename in batterij-elektrisch rijden en extra biobrandstoffenproductie. Waterstof wordt niet besproken. De door TNO gehanteerde rekenmethode om de werkgelegenheidseffecten te bepalen komt overeen met die van de Nationale Energie Verkenningen. De bestedingen worden geschat op basis van de verwachte fysieke maatregelen. Vervolgens wordt op basis van bedrijfstakprofielen de arbeidskosten en de werkgelegenheid geschat. TNO verwacht een vrij grote, tijdelijke toename van de werkgelegenheid dankzij de investeringen (ontwikkeling, bouw, installatie) en een kleinere toename voor onderhoud en bediening op de langere termijn.

Hoe zien de werkgelegenheidseffecten van waterstofmobiliteit eruit? Als afbakening wordt er hier gekeken naar de activiteiten binnen het H2GRoW project met de vraag welke impact deze activiteiten kunnen hebben bij grootschalige uitrol. Het gaat daarbij om de productie, aanleg en het onderhoud van zonneparken, windturbines, elektrolyzers, waterstofvoertuigen en -tankstations.

Productie en installatie van kapitaalgoederen

Welke werkgelegenheidseffecten de productie van de kapitaalgoederen zal hebben hangt voor een groot deel af van de herkomst. De kapitaalgoederen die in Nederland worden geproduceerd hebben uiteraard het grootste werkgelegenheidseffect. De vraag is dus of een sterke toename van waterstof-elektrisch rijden in Nederland zal leiden tot een toename van werkgelegenheid vanwege de productie van kapitaalgoederen in Nederland.

De productie van zonnepanelen wordt gedomineerd door China. Negen van de tien grootste zonnepanelenproducenten zijn Chinees en samen hebben zij een wereldwijd marktaandeel van meer dan 75% (81). In dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de zonnepanelen niet in Nederland worden geproduceerd. In het SDE++ advies van 2021 wordt voor de kosten van grondgebonden PV-parken met een capaciteit groter dan 1 MW € 540 investeringskosten per kW als referentiewaarde vastgesteld (82). Ongeveer 25% van de investeringskosten bestaan uit de installatie van de zonnepanelen, dit zijn voornamelijk arbeidskosten. Het installeren van een zonnepark van 1 MW vergt dus circa € 135.000 aan arbeidskosten hetgeen overeenkomt met 2 arbeidsjaren.

De productie en aanleg van windparken op zee levert al een substantiële bijdrage aan de Nederlandse economie. In het rapport De economische bijdrage van windenergie op zee schat PWC de bijdrage van deze sector voor 2017 op 2 miljard euro resulterend in 6.400 fte (83). De banen

bevinden zich op het gebied van ontwerp en ontwikkeling, funderingen, substations, transport, operatie en onderhoud en ontmanteling en hergebruik. Volgens dit rapport waren de kosten van wind op zee in 2017 € 3 miljoen per MW.

	€ k	Aandeel NL (%)	Aandeel NL (€ k)
Ontwerp en ontwikkeling	94	85	80
Turbine	985	2	20
Fundering	503	80	402
Substations en bekabeling	566	10	57
Logistiek en installatie	496	85	422
Operatie en onderhoud	80	60	48
Ontmanteling en hergebruik	225	40	90
	2.949		1.118

Tabel 40 Kosten van wind op zee per MW en de bijdrage aan de Nederlandse economie.

Tabel 40 toont de kosten van 1 MW wind op zee in duizenden euro's en het deel van deze kosten dat wordt besteed bij Nederlandse bedrijven. Het is duidelijk zichtbaar dat op het gebied van de turbine de Nederlandse positie zwak is maar dat de overige bestedingen voor een belangrijk deel binnen Nederland worden besteed. Uitgaande van de door PWC geconstateerde verhouding tussen toegevoegde waarde en aantal arbeidsplaatsen resulteert 1 MW wind op zee ongeveer 3,5 fte op. Voor het H2Grow project wordt 7.400 MWh van het net afgenomen in het scenario met een uitgebreide voertuigenvloot. Bij 4.000 vollasturen betekent dit een benodigde capaciteit van 2 MW (84). Hierbij moet worden opgemerkt dat deze windenergie weliswaar voldoende is om de electrolyser volledig te voorzien van groene stroom maar dat deze niet direct voor de electrolyser wordt geproduceerd en geleverd.

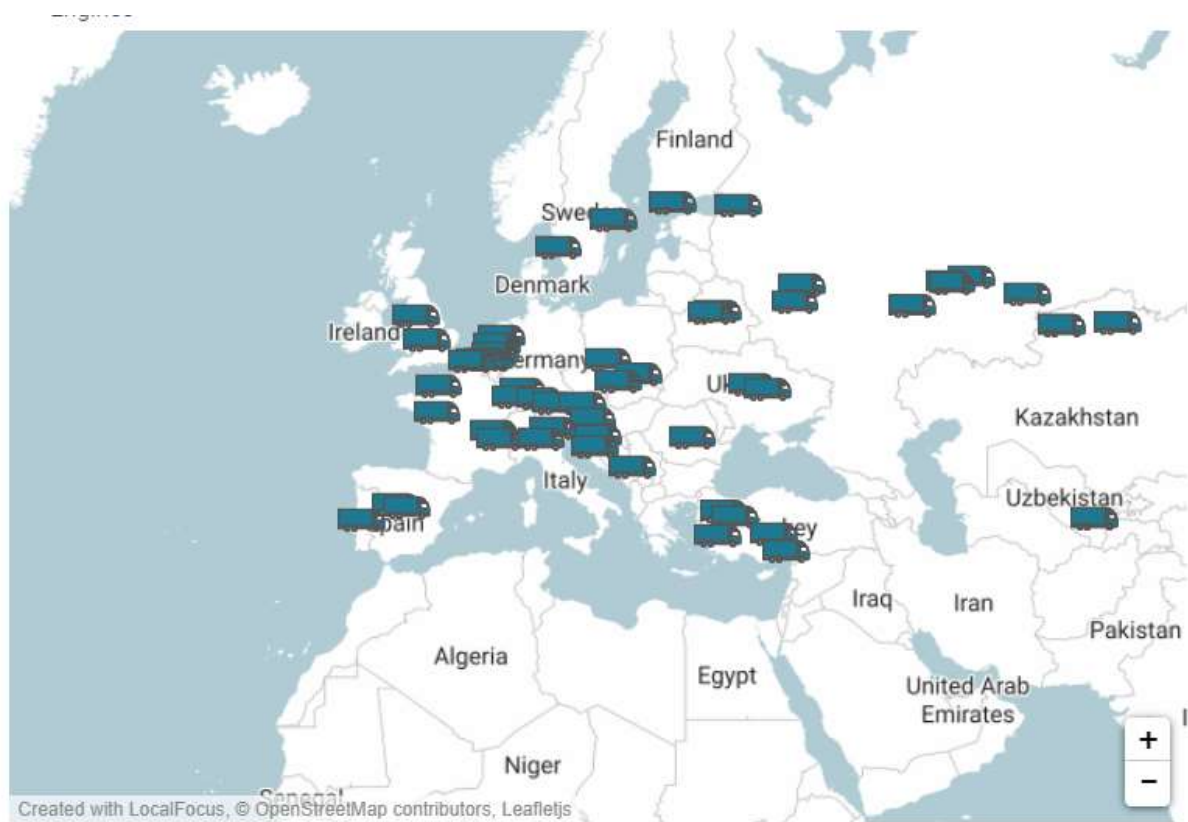
De productie van electrolyzers is volop in ontwikkeling. China is wereldmarktleider op het gebied van alkaline electrolyzers. De Europese Unie heeft middels het FCH JU programma meerdere projecten uitgevoerd op het gebied van PEM electrolyser productie (85). Er bestaat geen grote Nederlandse producent van elektrolyzers, wel kleinere initiatieven zoals Hydron Energy. Op dit moment moet er vanuit worden gegaan dat de productie van grote electrolyzers (> 1 MW) niet in Nederland zal plaatsvinden.

Ook de installatie van een electrolyser vergt arbeid. In de studie Werk door groene waterstof van CE Delft wordt het werkgelegenheidseffect van grootschalige uitrol van groene waterstof in Nederland besproken (86). In deze studie worden de kosten van de electrolyser verdeeld in de kosten voor de onderdelen en de kosten voor de arbeid. De arbeidskosten worden geschat op € 236 per kW capaciteit. Voor een electrolyser van 1 MW betekent dit dat de arbeidskosten € 236.000 bedragen, dit komt neer op 3,5 fte.

De productie van waterstofvoertuigen is volop in ontwikkeling. Diverse fabrikanten hebben voertuigen op bescheiden schaal in productie gebracht of plannen de introductie van nieuwe voertuigen. Indien de productie of assemblage van waterstofvoertuigen in Nederland zou plaatsvinden dan leidt dit tot additionele werkgelegenheid. Hyzon Motors Europe BV heeft in samenwerking met Holthausen Clean Technology BV een productiefaciliteit geopend in Winschoten (87). Hiringa Energy uit Nieuw Zeeland heeft 1.500 waterstoftrucks besteld bij Hyzon. De fabriek in Winschoten zal op termijn mogelijk werkgelegenheid bieden aan 1.000 mensen (88). Extra werkgelegenheid dankzij de productie van waterstofvoertuigen in Nederland kan dus een effect zijn van de introductie van waterstofmobiliteit.

De werkgelegenheid tijdens de productie van een waterstoftruck bestaat voornamelijk uit de bouw en assemblage van het voertuig. Aangenomen wordt dat de elektrische aandrijving, de brandstofcel en de waterstoftanks worden geïmporteerd. Dit is conform de eerder genoemde studie van CE Delft waarin de werkgelegenheid bij de productie van een waterstofbus wordt geschat. De hogere kosten van een waterstoftruck worden op dit moment voornamelijk veroorzaakt door de kosten van de genoemde onderdelen. Onder de veronderstelling dat de productie en montage van een waterstoftruck even arbeidsintensief is als een dieseltruck wordt geschat dat er 1,5 fte¹⁶ nodig is voor de productie van een waterstoftruck.

Volgens gegevens van de European Automobile Manufacturers Association werden er in Europa 387.571 vrachtwagens geproduceerd of geassembleerd in 2019 (89). Figuur 9 toont de 58 fabrieken waar dit gebeurt.



Figuur 9 Productie en assemblage fabrieken voor vrachtwagens in Europa. Bron ACEA.

De vrachtwagenproductie en assemblage is volgens dezelfde bron 2,1% van het totaal aantal geproduceerde motorvoertuigen in Europa. Cijfers van de werkgelegenheid voor productie en assemblage van vrachtwagens in Europa ontbreken. Wel is bekend dat de werkgelegenheid voor de productie van het totale aantal motorvoertuigen 3,7 miljoen werknemers betreft. Aangenomen dat ook hiervan 2,1% de productie en assemblage van vrachtwagens betreft resulteert dit in een schatting van 77.700 banen.

¹⁶ Het annual report van Scania stelt dat dit bedrijf in 2020 circa 72.000 trucks en bussen heeft geproduceerd met 50.000 werknemers.

Het werkgelegenheidseffect van de productie van waterstofvoertuigen hangt af van meerdere factoren. In de eerste plaats is het aantal te produceren voertuigen van belang. Dit zal afhangen van de plaats die waterstofmobiliteit in het vervoer gaat innemen. Ten tweede is de positie van Nederlandse producenten ten opzichte van de buitenlandse producenten een bepalende factor. Door voorop te lopen bij de ontwikkeling van waterstoftrucks vergroot Nederland haar kansen dat in de toekomst de nieuwe werkgelegenheid voor deze productie in Nederland ontstaat. Het werkgelegenheidseffect zal voor Nederland per saldo alleen positief zijn indien de nieuwe werkgelegenheid omvangrijker zal zijn dan de werkgelegenheid die verloren gaat op het gebied van de productie van diesellootvoertuigen. De European Automobile Manufacturers Association stelt dat in 2040 alle nieuwe trucks fossielvrij dienen te zijn (89).

De aanleg van waterstoftankstations zal ook een werkgelegenheidseffect kennen. In vergelijking met de huidige situatie waarbij een volledige infrastructuur aanwezig is voor het aftanken van voertuigen moet een dergelijke infrastructuur voor het alternatief nog worden aangelegd. CE Delft schat dat de productie en constructie van een waterstoftankstation 8 arbeidsjaren vergt. Hiervan zijn 5 arbeidsjaren gerelateerd aan de productie van de onderdelen en 3 aan de overige werkzaamheden (86).

Onderhoud en beheer van kapitaalgoederen

	Capex	%onderhoud	Onderhoudskosten	Aandeel arbeid	Arbeidskosten
Electrolyser	€ 1.343.000	4	€ 53.720	50%	€ 26.860
Compressor	€ 408.000	4	€ 16.320	50%	€ 8.160
Tubetrailers	€ 177.000	2	€ 3.540	50%	€ 1.770
Tankstation	€ 809.000	4	€ 32.360	50%	€ 16.180
Vrachtwagens	39 stuks	€ 5.384/stuk	€ 209.986	50%	€ 104.993
Bestelbussen	9 stuks	€ 360/stuk	€ 3.240	50%	€ 1.620
Totaal					€ 159.583
FTE					2,6

Tabel 41 Arbeidskosten per jaar veroorzaakt door onderhoud.

Tabel 41 toont de exploitatie- en onderhoudskosten per jaar aan voor de kapitaalgoederen zoals deze eerder zijn beschreven. Het betreft het scenario waarbij wordt uitgegaan van een uitgebreide vloot voertuigen. In de literatuur worden de onderhoudskosten meestal uitgedrukt als een percentage van de aanschafwaarde (Capex). Voor de voertuigen zijn de onderhoudskosten gebaseerd op een studie bij een transportbedrijf (90). Onder de aanname dat 50% van de onderhoudskosten bestaan uit arbeidskosten en dat een onderhoudsmonteur € 62.000 per jaar kost (het gemiddelde van de sectoren autoreparatie en enkele electrotechnische sectoren (86)) is met het onderhoud van alle kapitaalgoederen in de keten in totaal 2,6 FTE gemoeid.

	Aantal	Kengetal	Eenmalige werkgelegenheid (FTE/jaar)	Terugkerende werkgelegenheid (FTE/jaar)
PV-park (FTE/MW)	1	2	2	
Wind op zee (FTE/MW)	2	3,5	7	
Electrolyser (FTE/MW)	1	3,5	3,5	
Vrachtwagens (FTE/stuk)	39	1,5	58,5	
Tankstation (FTE/stuk)	1	8	8	
Beheer en onderhoud				2,6
Totaal			79	2,6

Tabel 42 Werkgelegenheidseffecten van projectalternatief met uitgebreide vloot.

In Tabel 42 zijn de werkgelegenheidseffecten te zien van het projectalternatief met een uitgebreide voertuigenvloot. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit niet uitsluitend additionele arbeid betreft. De werkgelegenheid moet worden vergeleken met de werkgelegenheid die het nulalternatief – rijden op diesel- kent. De productie en installatie van het PV-park, wind op zee, de electrolysers en tankstations kunnen worden beschouwd als extra economische activiteit. De productie van waterstofvoertuigen vervangt echter de productie van een regulier voertuig. Hierbij is alleen sprake van additionele arbeid indien het waterstofvoertuig in Nederland wordt geproduceerd en geassembleerd en een geïmporteerd voertuig vervangt. De exploitatie en onderhoud van de kapitaalgoederen in het project vervangt dezelfde werkzaamheden voor het nulalternatief (dieselvoertuigen) en is dus niet additioneel.

Het onderscheid tussen eenmalige en terugkerende werkgelegenheid verdient ook nadere toelichting. De productie en installatie van de kapitaalgoederen is eenmalig in die zin dat zij voor een concreet project bij aanvang eenmalig plaatsvindt. Het onderhoud keert vervolgens jaarlijks terug. Indien waterstofmobiliteit een steeds grotere plaats in het systeem gaat innemen dan zullen er uiteraard steeds nieuwe projecten van start gaan. Er ontstaat dan een continue stroom van de productie en installatie van alle onderdelen uit de keten.

Voor de MKBA valt alleen de additionele werkgelegenheid onder de baten. In vergelijking met het nulalternatief worden de beheer- en onderhoudswerkzaamheden niet als additioneel gezien. Aangenomen wordt dat beheer en onderhoud van de voertuigen en het tankstation niet verschillen met het nulalternatief. Aanleg van zonneparken, windturbines en electrolysers om waterstof mee te produceren zijn wel additioneel. Voor wat betreft de vrachtwagens zijn twee varianten opgesteld. De werkgelegenheid is additioneel indien de vrachtwagens in Nederland worden geproduceerd en bovendien geïmporteerde dieselvoertuigen vervangen. Waterstofvoertuigen importeren leidt niet tot additionele arbeid, Nederlandse productie vervangen doet dat ook niet. Tabel 43 toont de additionele werkgelegenheid van het projectalternatief in FTE en in euro's.

	Additionele arbeid laag (FTE/jaar)	Additionele arbeid laag (€/jaar)	Additionele arbeid hoog (FTE/jaar)	Additionele arbeid hoog (€/jaar)
PV-park (FTE/MW)	2	€ 124.000	2	€ 124.000
Wind op zee (FTE/MW)	7	€ 434.000	7	€ 434.000
Electrolyser (FTE/MW)	3,5	€ 217.000	3,5	€ 217.000
Vrachtwagens (FTE/stuk)	0	0	58,5	€ 3.627.000
Tankstation (FTE/stuk)	8	€ 496.000	8	€ 496.000
Totaal	20,5	€ 1.271.000	79	€ 4.898.000

Tabel 43 Additionele werkgelegenheid in FTE en in euro's voor het projectalternatief met uitgebreide vloot.

De vraag naar schaarse materialen

Bij het produceren van PEM electrolyzers wordt gebruik gemaakt van platina en iridium. Deze metalen worden wereldwijd in beperkte mate gewonnen en bij een sterke toename van de productie van het aantal PEM electrolyzers kan deze schaarste een beperking vormen (91). De International Renewable Energy Agency (IRENA) stelt dat er 1 gram/kW platina en 1 tot 2,5 gram/kW iridium nodig is voor een PEM electrolyser (92). De jaarlijkse productie van platina is 200 ton/jaar en van iridium 7 tot 7,5 ton per jaar. Voor een jaarlijkse productie van PEM-electrolyzers met een totale capaciteit van 7.000 MW zou dus de wereldwijde productie van iridium nodig zijn, uitgaande van de ondergrens van 1 gram/kW. Dit is in lijn met de conclusies in het rapport *Op weg naar een groene toekomst* van TNO (93) waarin wordt gesteld dat 122% van de jaarlijkse wereldwijde iridiumproductie nodig is om aan de verwachte vraag te voldoen voor de productie van electrolyzers.

Voor alkaline electrolyzers wordt platina, cobalt en nikkel gebruikt. Het is echter mogelijk om Alkaline electrolyzers te bouwen zonder platina en cobalt (92). Nikkel is minder schaars in vergelijking met de andere metalen.

Ook de brandstofcel in het voertuig maakt gebruik van platina. Voor een personenauto betreft dit 10 tot 56 gram, voor vrachtwagens zijn geen gegevens gevonden (94).

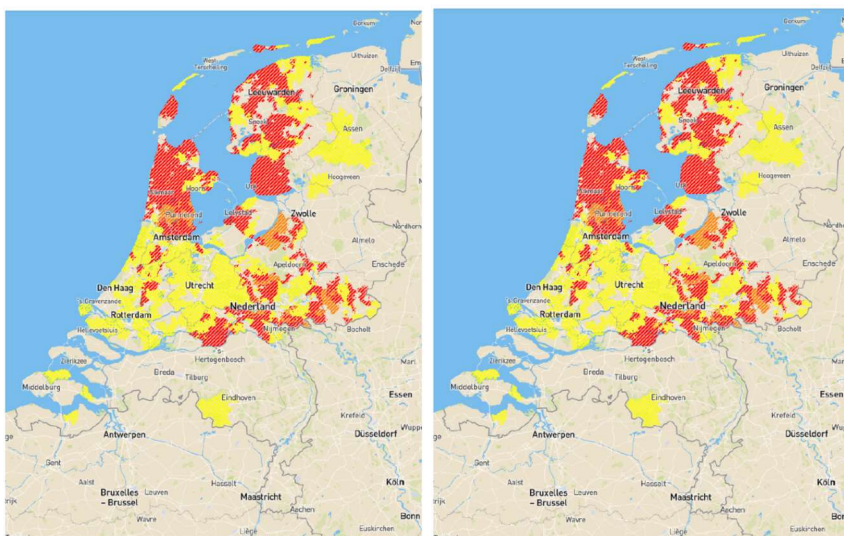
Effecten op de elektriciteitsinfrastructuur

Indien er slechts op relatief kleine schaal waterstoftrucks in Nederland rijden zijn de effecten op de elektriciteitsinfrastructuur ook niet groot. Indien de stroom wordt geproduceerd met windturbines of zonnepanelen dan zal dit het netwerk belasten voor zover de stroom niet rechtstreeks wordt gebruikt voor de productie van waterstof. Ook de electrolyser zal zorgen voor belasting van het netwerk. Tot nu toe is verondersteld dat de kosten voor de belasting van het netwerk worden weergegeven door de transportkosten van de elektriciteit. Deze vergoeding is immers een vergoeding voor de netbeheerder die daarmee de elektriciteitsinfrastructuur moet bekostigen.

Bij grootschaliger gebruik van waterstoftrucks en uitgaande van productie in Nederland van groene stroom is de impact op het elektriciteitsnetwerk groter. Wat zijn de effecten op het netwerk bij een grootschalige acceptatie? In de eerste plaats zal de vraag naar groene stroom fors stijgen. Dit heeft gevolgen voor de stroomproductie in Nederland. Het onregelmatige karakter van deze stroomproductie heeft gevolgen voor de rol van opslag van energie en de rol die waterstof daarin kan vervullen.

Bij de beschrijving van het nulalternatief is vastgesteld dat er in 2030 naar verwachting tussen de 137.000 en 152.000 vrachtwagens in Nederland zullen rijden. Wanneer de helft van deze vrachtwagens op waterstof zou rijden dan komt dit neer op circa 72.000 stuks. Vrachtwagens met een tank voor 35 kg waterstof¹⁷ die 260 dagen per jaar rijden en per dag een tank verbruiken resulteren in een vraag naar waterstof van 655 miljoen kg. De hiervan afgeleide vraag naar elektriciteit uitgaande van een elektrolyser efficiency van 65% bedraagt bijna 35.000 GWh. Om deze elektriciteit te kunnen produceren wordt uitgegaan van windturbines op zee met een capaciteit van 3 MW en 4.000 vollasturen per jaar. Er zijn in dit scenario 2.800 windturbines op zee nodig met een gezamenlijke capaciteit van ruim 8 GW. Ter referentie, de huidige doelstelling voor wind op zee in 2030 betreft een capaciteit van 21 GW¹⁸. De transportsector zou dus een aanzienlijk deel van de elektriciteitsproductie op zee nodig hebben om de helft van de vloot waterstof elektrisch te laten rijden.

Het is nog onbekend hoe bij grootschalige uitrol de waterstofproductie plaats zal vinden. Uitgaande van windturbines op zee kan de elektriciteit worden getransporteerd naar elektrolyzers aan land. Deze electrolysers kunnen verspreid of meer gecentraliseerd zijn. Verder kunnen de electrolysers via een directe lijn aan een windturbine of zonnepark zijn gekoppeld of er kan gebruik worden gemaakt van het elektriciteitsnetwerk. Voor netgekoppelde electrolysers wordt in het conceptadvies voor de de SDE++ regeling voor waterstofproductie uitgegaan van netwerkkosten van € 50,4 per KWe per jaar (95). Electrolysers worden in dit advies aangesloten op het tussenspanningsnet (TS). Voor de bepaling van de kosten is uitgegaan van de tarievenbesluiten van de regionale netbeheerders en TenneT voor 2020 die horen bij een TS-aansluiting. Deze tarieven zijn met 8% verhoogd om rekening te houden met de verwachte toekomstige tariefstijgingen.



Figuur 10 Capaciteitskaart elektriciteitsnet afname (links) en invoeding (rechts).¹⁹

Figuur 10 toont de capaciteitskaart van het elektriciteitsnet van Nederland. Te zien is dat voor zowel afname als invoeding er in een aantal regio's sprake is van gebrek aan transportcapaciteit. Een sterke groei van het aantal windturbines en zonneparken en het plaatsen van een grote hoeveelheid electrolysers zal hieraan bijdragen indien er geen gebruik wordt gemaakt van een directe lijn aansluiting maar van netgekoppelde installaties. De toekomstige kosten van eventuele verzwaring

¹⁷ <https://imotion.hyundai.nl/eerste-waterstoftrucks-hyundai-h2-xcient-naar-europa/>

¹⁸ <https://windopzee.nl/onderwerpen/wind-zee/wanneer-hoeveel/wind-zee-rond-2030/>

¹⁹ <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/>

van het netwerk zullen afhangen van de wijze waarop de waterstofproductie plaats gaat vinden. Indien het beslag op de transportcapaciteit van het elektriciteitsnet moet worden beperkt, is het gebruiken van electrolyzers direct bij de windturbines en zonneparken een goede manier om extra netwerkkosten te vermijden.

Ruimtebeslag

Grootschalige elektrolyse heeft ook ruimtebeslag tot gevolg. Een 1 MW electrolyser past in een standaard 40 voet container²⁰, de afmetingen van een dergelijke container zijn 12,2 * 2,44 * 2,59 meter. De oppervlakte is dus ongeveer gelijk aan 30 m². 8.000 electrolyzers betekenen in dat geval een ruimtebeslag van 24 hectare. In vergelijking met het ruimtebeslag van de windturbines en zonneparken die nodig zullen zijn voor de productie van groene stroom is het ruimtebeslag van de electrolyzers beperkt.

Ontwikkeling waterstoftransportnet

Indien er sprake is van grootschalige toepassing van waterstofmobiliteit wordt het transport van waterstof via gasleidingen een alternatief voor het transport met tubetrailers. In het onderzoeksproject HyWay 27 is onderzocht of delen van het bestaande aardgastransportnet kunnen worden gebruikt voor het transport van waterstof (96). De voornaamste conclusies van dit rapport zijn:

- Een transportnet voor waterstof in Nederland is nodig om in 2030 industriële clusters te kunnen voorzien van groene waterstof.
- Bestaande parallelle leidingen in het hoofdtransportnet kunnen worden hergebruikt. De investeringskosten zijn naar schatting € 1,5 miljard voor technische aanpassingen en een aantal nieuwe leidingen.
- Overheidsinterventie is nodig omdat de vraag naar waterstof zich geleidelijk ontwikkelt terwijl bij de aanleg van de waterstofinfrastructuur moet worden uitgegaan van de capaciteitsbehoefte op de lange termijn.

De staatssecretaris van economische zaken en klimaat heeft op 30 juni 2021 besloten om te starten met het ontwikkelen van een plan voor een onderbouwde en gefaseerde uitrol van een landelijk waterstoftransportnet²¹. Voor de mobiliteitssector betekent dit dat waterstof tankstations in de toekomst mogelijk aangesloten kunnen worden op een waterstoftransportnet. Dit kan een kostenbesparing inhouden voor de supply chain. Bij grote volumes is transport via buizen goedkoper dan transport met tubetrailers. Daarnaast kan een waterstoftransportnet het elektriciteitsnet ontlasten. Grootschalige toepassing van waterstofmobiliteit kan door het uitvoeren van vraag naar waterstof bijdragen aan de totstandkoming van een waterstoftransportnet.

Voor de maatschappelijke kostenbatenanalyse kan dit een kostendaling als gevolg hebben. In dit onderzoek is tot nu toe uitgegaan van transport van waterstof met behulp van tubetrailers. De CAPEX en OPEX van de tubetrailer bestaan uit de aanschafkosten, de brandstofkosten, de chauffeurskosten en de onderhoudskosten. Bij de uitgebreide vloot (39 waterstoftrucks) is de netto contante waarde van deze kosten ruim € 1,6 miljoen (zie Tabel 26).

²⁰ https://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2020/10/2020_1MWELX_Spec102120_F.pdf

²¹ <https://open.overheid.nl/repository/ronl-66d67edc-8d97-42e5-9f61-c4bc4bf5a1c6/1/pdf/21168852.pdf>

Voor het scenario van de uitgebreide vloot moet er ieder uur 18 kg waterstof naar het tankstation worden getransporteerd, dit is gelijk aan bijna 200 Nm³. De periodieke aansluit- en transporttarieven voor gas van Enexis per 1 januari 2022 voor grootverbruik bedragen²²:

- Aansluitdienst: € 1.018 per jaar
- Vastrecht transportdienst: € 216 per jaar
- Capaciteitsafhankelijk transporttarief: € 4.264 per jaar

Uitgaande van een inflatie van 2% en een discontovoet van 6% is de netto contante waarde van de transportkosten gelijk aan € 60.260. Hierbij wordt verondersteld dat op termijn de transportkosten van waterstof via het gasnet gelijk zullen zijn aan de kosten van aardgas. Het is waarschijnlijk dat investeringen en lagere volumes tot hogere transportkosten zullen leiden. Wel maakt bovenstaande berekening duidelijk dat de ontwikkeling van een waterstoftransportnetwerk een aanzienlijke besparing kan opleveren in vergelijking met transport door middel van tubetrailers.

Kosten				Baten
CAPEX				
PV	€ 470.698	Vermeden brandstofkosten	€ 3.066.334	
Electrolyser	€ 1.343.526	Vermeden CO2-uitstoot	€ 618.148	
Vervanging stack	€ 685.468	Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 6.285.264	
Compressor	€ 157.239	Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 425.319	
Tube trailer	€ 177.603	Opbrengst waterstof	€ -16.226	
Opslag	€ -	Onderhoud vrachtwagens	€ 3.756.268	
Tankstation	€ 1.585.029	Onderhoud bestelbussen	€ 175.492	
Vrachtwagens	€ 26.190.098	Werkgelegenheid	€ 4.898.000	
Bestelbussen	€ 2.013.175			€ 19.208.598
	€ 32.622.835			
OPEX				
Elektriciteit voor productie H2	€ 3.672.347	Niet monetaire effecten		
Transportkosten netwerk	€ 493.088	Toegang zero-emissie zones	+	P.M.
Kosten GVO	€ 159.061	Vergunningsverlening	-	P.M.
Compressie	€ 266.007	Veiligheids-maatregelen	-	P.M.
transport	€ 575.696	Onderhoud	+/-	P.M.
Chauffeur	€ 787.084	Gebruik schaarse materialen	-	P.M.
Elektriciteit tankstation	€ 148.251	Belasting elektriciteitsnet	+/-	P.M.
Onderhoud:		Ruimtebeslag	0	P.M.
PV	€ 61.926	Ontwikkeling		
Electrolyser	€ 657.624	waterstoftransportnet	+	P.M.
Compressor	€ 68.936			
Tube trailer	€ 32.881			
Tankstation	€ 975.476			
Vrachtwagens	€ 3.756.268			
Bestelbussen	€ 175.492			
	€ 11.830.137	NPV		€ 25.244.374
Totaal	€ 44.452.973	Totaal		€ 44.452.973

Tabel 44 MKBA bij gebruik van PV en elektriciteitsnet en een uitgebreide vloot inclusief niet monetaire effecten.

Tabel 44 toont de resultaten van de MKBA inclusief de niet-monetaire effecten. Deze effecten moeten worden meegenomen in de besluitvorming waarbij moet worden benadrukt dat het hier

²² <https://www.enexis.nl/zakelijk/tarieven/tariefladen>

gaat om een vergelijking met dieselvrachtwagens. In de volgende paragraaf zal worden ingegaan op het verschil tussen waterstofvoertuigen en batterij elektrische voertuigen.

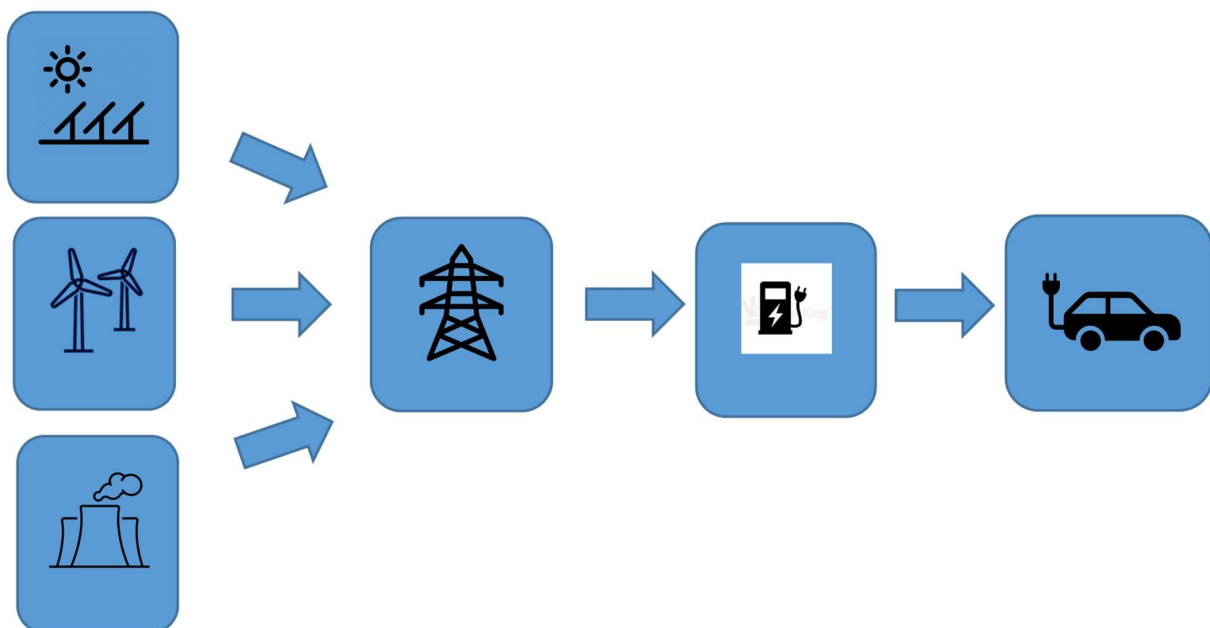
12. De vergelijking met batterij elektrische vrachtwagens.

Dit onderzoek heeft zich tot nu toe gericht op de vergelijking tussen waterstofvoertuigen en diesellootuigen. De reden hiervoor is dat uitgaande van de huidige situatie het wagenpark nog grotendeels bestaat uit benzine- en diesellootuigen. Uiteraard is er ook sprake van een snelle ontwikkeling op het gebied van batterij elektrische voertuigen. In opdracht van ElaadNL en Enpuls hebben Panteia en Qirion een onderzoek gedaan naar de elektrificatie van het goederenvervoer in Nederland (97). In dit onderzoek wordt gesteld dat de elektrificatie van bestelwagens is begonnen en aan momentum wint. Voor het opladen van bestelwagens is een laadpaal van 50 kW doorgaans voldoende. De kosten van de laadinfrastructuur voor bestelwagens bedragen volgens dit onderzoek circa 2% van de total cost of ownership (TCO). Bestelwagens rijden gemiddeld ongeveer 35.000 kilometer per jaar en kunnen op de bedrijfslocatie of bij de werknemer thuis worden opgeladen.

Voor vrachtwagens geldt dat zij gemiddeld 78.000 kilometer per jaar rijden maar dat er ook een categorie is die jaarlijks tussen de 90.000 en 160.000 kilometer rijdt. Er zijn nog maar weinig elektrische vrachtwagens in gebruik. De voornaamste redenen die worden genoemd waarom de elektrificatie van vrachtwagens achterloopt op die van bestelwagens zijn:

- De laadtijd maakt de logistieke planning complexer;
- De hogere infrastructuurkosten vanwege de zwaardere elektrische aansluiting maakt de TCO ongunstiger in vergelijking met het elektrificeren van bestelwagens;
- Er is een lange doorlooptijd voor de noodzakelijke verzwaring van de aansluiting op het publieke net.

In dit hoofdstuk zal worden onderzocht wat de verschillen zijn in kosten en baten tussen batterij elektrische vrachtwagens en waterstofvrachtwagens. Daarvoor zal in de eerste plaats worden onderzocht wat de verwachte kosten zijn van batterij elektrisch vrachtvervoer.



Figuur 11 Leveringsketen batterij elektrisch vervoer.

Figuur 11 toont schematisch de leveringsketen van batterij elektrisch transport. Het valt op dat het aantal schakels in de keten kleiner is dan dat van de waterstofketen in Figuur 2. Voor wat betreft de opwekking en kosten van de elektriciteit wordt uitgegaan van dezelfde configuratie als die van de waterstofketen. Er is sprake van een zonnepark met een capaciteit van 1 MW en de elektriciteitsproductie wordt aangevuld met groene stroom van het net waarvoor GVO certificaten worden gekocht. De elektriciteit wordt getransporteerd met behulp van het elektriciteitsnetwerk. De lader is aangesloten op het netwerk en kan worden gebruikt voor het opladen. De twee schakels die eerst zullen worden besproken zijn de oplader en het batterij elektrische voertuig.

Laders en snelladers voor elektrische trucks.

Er zijn meerdere factoren van invloed op de kosten van de laadinfrastructuur. Het laadvermogen van een laadpaal hangt af van het aantal fasen en van de stroomsterkte. Voor de topsector logistiek heeft Panteia een model opgesteld voor de berekening van de kosten van batterij elektrisch vrachtvervoer²³. De gebruikte gegevens in dit model op het gebied van de laadinfrastructuur zijn te zien in Tabel 45.

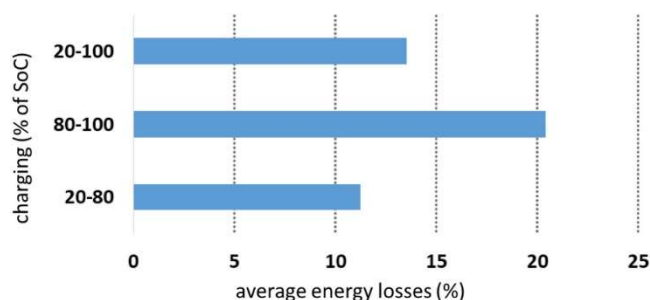
		AC3,7	AC11	AC22	FC50	HPC150	HPC350
		3,7 kW	11 kW	22 kW	50 kW	150 kW	350 kW
		1x16A	3x16A	3x32A			
CAPEX, Plaatsing		€	€	€	€	€	€
Inkoopprijs paal	eenmalig	700	1.800	2.100	17.500	52.500	122.500
Locatiebepaling, engineering, proj mgt	eenmalig	270	370	370	1.600	4.200	4.200
Civiele werken/plaatsing	eenmalig	35	90	105	7.000	21.000	49.000
Graaf werk	eenmalig	500	500	500	1.000	1.500	2.000
Aansluitkosten netbeheerder	eenmalig	0	0	0	450	1.200	3.000
Totaal	eenmalig	1.505	2.760	3.075	27.550	80.400	180.700
Afschrijvingstermijn	jaar	10	10	10	10	10	10
Totaal	per jaar	151	276	308	2.755	8.040	18.070
		AC3,7	AC11	AC22	FC50	HPC150	HPC350
OPEX, Operationele kosten							
Periodieke kosten netaansluiting (!)	per jaar	0	224	900	2.000	2.500	5.000
Communicatiekosten	per jaar	10	48	70	70	70	70
Verzekeringspremie (schade)	per jaar	28	72	84	700	2.100	4.900
Onderhoud/reparatie	per jaar	20	20	230	875	2.625	6.125
Service bij gebruikersproblemen	per jaar	50	50	50	100	100	100
Totaal	per jaar	108	414	1.334	3.745	7.395	16.195

Tabel 45 Capex en opex van laadinfrastructuur bij verschillende vermogens.

²³ <https://topsectorlogistiek.nl/tco-vracht/>

De gegevens in Tabel 45 komen overeen met andere bronnen waarin de kosten van laadinfrastructuur worden besproken (98) (99). Omdat de Panteia studie betrekking heeft op de situatie in Nederland wordt van deze informatie uitgegaan.

Het opladen van een batterij kost energie. Het betreft het verbruik van de oplader zelf en ook de productie van warmte die leidt tot verlies. Panteia gaat uit van 90% efficiëntie bij opladen tot 20 kW en 89% bij hogere vermogens. Deze efficiëntie wordt bevestigd door een studie van de California Air Resources Board (CARB) (100). Een studie gepubliceerd in Energy Reports onderzoekt de relatie tussen de efficiëntie van opladen en de mate waarin de batterij volledig wordt geladen (101). Een duidelijke conclusie is dat bij het volledig opladen van een batterij de laatste 20 procent het meeste energieverlies veroorzaakt (Figuur 12).



Figuur 12 Energieverlies bij het opladen in relatie tot verschillende niveaus van opladen.

De belangrijkste aanbeveling op basis van de gegevens van Figuur 12 is om de batterij van een elektrische truck minstens 20% geladen te houden en niet voller te laden dan 80%. In dit onderzoek zal worden uitgegaan van 89% efficiëntie bij opladen. Ook zal worden onderzocht wat de aanbeveling betekent voor wat betreft het gebruik en de logistiek.

Voor wat betreft de chargers zal in dit onderzoek in eerste instantie worden uitgegaan van de gegevens zoals deze worden samengevat in Tabel 46.

	Waarde
Vermogen (kW)	50
Efficiency (%)	89
Capex (€ per stuk)	27.550
Opex (€ per jaar)	3.745
Levensduur	10

Tabel 46 Kosten en overige kenmerken van de e-charger.

De kosten van een batterij elektrische truck

Over de kosten van batterij elektrische trucks zijn meerdere publicaties beschikbaar. Tabel 47 toont van meerder studies de geschatte kosten voor een batterij elektrische truck met een bepaald batterijvermogen en bereik. De kosten per kWh en de kosten per kilometer bereik verschillen aanzienlijk per studie. Dit kan deels worden verklaard door de gehanteerde methode. De CARB gebruikt voor de huidige kosten van een batterij elektrische truck de prijzen van fabrikanten zoals deze bekend zijn via het Californische subsidieprogramma HVIP (67). Andere studies gebruiken een meer theoretische methode waarbij wordt uitgegaan van de kosten van een truck zonder motor vermeerderd met de kosten van een batterij en een elektrische aandrijflijn (66) (102). Deze trucks zijn niet op dit moment niet verkrijgbaar op de markt maar de onderdelen zijn dat wel.

Type	Specificatie (kWh)	Bereik (km)	Prijs in € (2020)	Prijs in € (2025-2030)	Bron	€/kWh	€/km
Class 8	2.200	1200	742.000	385.000	(66)	337	618
Class 8	1.436	800	526.000	287.000	(66)	366	658
Class 8	Onbekend	400	487.200	226.000-362.000	(50)		1.218
Class 8	1.470	800	863.000	379.000 – 630.000	(50)	587	1.079
Class 8	510	288	432.000	178.000	(67)	847	1.500
Class 8	797	600	191.000	132.000	(102)	240	318
Class 8	1.062	800	224.000	145.000	(102)	211	280
Class 5	1.354	600	385.000	Geen schatting	(103)	284	642
Class 5	1.187	800	417.300	145.300	(104)	352	522

Tabel 47 Capaciteit, bereik en prijs van batterij elektrische trucks.

Commerciële prijzen van batterij elektrische trucks zijn niet beschikbaar. De producenten hebben wel informatie over hun voertuigen op hun websites maar noemen geen verkoopprijzen. Van enkele modellen wordt gesteld dat zij 2 tot 3 keer zo duur zullen zijn in aanschaf als een dieseltruck.

Type	Specificatie (kWh)	Bereik (km)	Prijs in € (2020)	€/kWh	€/km
BYD 8TT ²⁴		240	272.000		1133
eCascadia ²⁵	475	400	253.000-379.000	533-798	633-948
Tesla semi ²⁶		480	137.000		285
Tesla semi ²⁷	875 ²⁸	800	164.000	187	205
NikolaTre ²⁹	753	560	309.000	410	552

Tabel 48 Geschatte prijzen van batterij elektrische trucks.

Tabel 48 toont de geschatte prijzen van enkele trucks. De informatie is afkomstig van websites die publiceren over de ontwikkeling van batterij elektrische trucks. De Tesla Semi is nog niet beschikbaar, de verwachte prijzen worden genoemd op de Tesla website.

²⁴ <https://www.fydafreightliner.com/PrintInventory-BYD-8TT-Walton-KY-id-11534173>

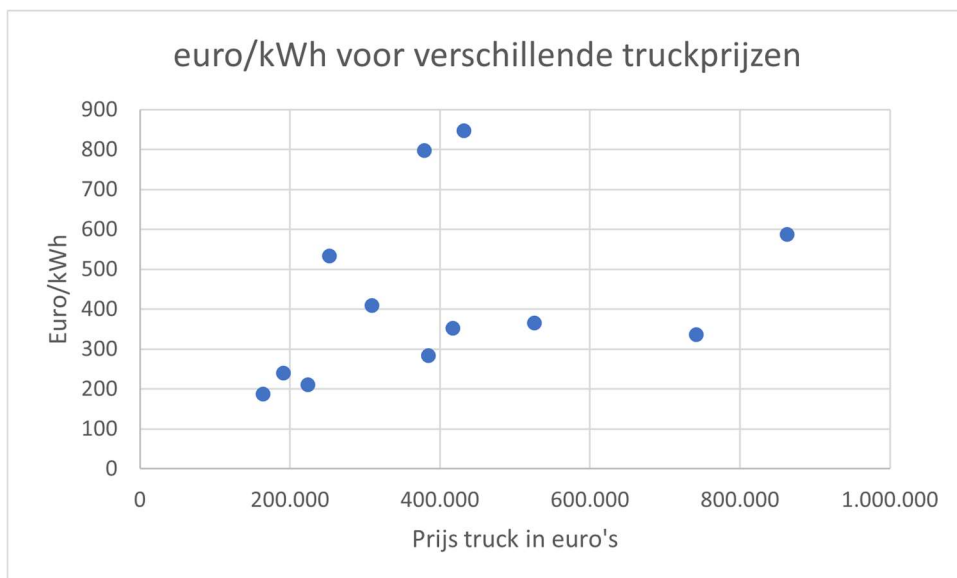
²⁵ <https://www.autoweek.com/news/green-cars/a36506185/electric-big-rig-semi-trucks/>

²⁶ <https://www.tesla.com/semi>

²⁷ <https://www.tesla.com/semi>

²⁸ <https://insideevs.com/news/521840/tesla-semi-480-battery-analysis/>

²⁹ <https://www.cpr.org/2022/03/22/electric-semi-truck-vehicles/>



Figuur 13 Euro per kWh voor diverse truckprijzen.

Figuur 13 toont de kosten in euro's per kWh voor de diverse truckprijzen zoals genoemd in Tabel 47 en Tabel 48. Er is geen duidelijk verband tussen de kosten van een truck en het batterijvermogen. Het batterijvermogen is blijkbaar niet de zwaarstwegende factor in de verwachte totale kosten. In dit onderzoek zal eerst uit worden gegaan van de gemiddelde waarden van de onderzoeksgegevens. Een batterij elektrische truck kost daarmee € 407.000 met een vermogen van 950 kWh hetgeen neerkomt op € 429/kWh.

Het bereik van de truck uitgaande van de gemiddelde gegevens is 625 kilometer. Dit staat gelijk aan een verbruik van 1,5 kWh per kilometer. Dit lijkt in vergelijking met andere bronnen een optimistische efficiëntie. Het eerder genoemde model van Panteia gaat uit van 2,086 kWh per kilometer. Uit een onderzoek naar de efficiëntie van batterij elektrische bussen en trucks waarbij wordt uitgegaan van het gemeten verbruik van diverse Class 8 tractors onder verschillende omstandigheden wordt een efficiëntie van 1,8 kWh per kilometer gemeten (100). Voor dit onderzoek zal eerst worden uitgegaan van deze 1,8 kWh/km en dus van een bereik van 525 km.

De verwachting is dat de onderhoudskosten van een batterij elektrische truck lager zullen zijn dan die van een diesel- of waterstoftruck. De reden hiervoor is dat een batterij elektrische truck minder bewegende delen dan een dieseltruck gebruikt en minder componenten nodig heeft dan een waterstoftruck. Inclusief banden, reparaties en gepland onderhoud worden de onderhoudskosten voor deze studie gesteld op € 0,135 per kilometer (49) (50).

Voor wat betreft de batterij elektrische trucks zal in dit onderzoek in eerste instantie worden uitgegaan van de gegevens zoals deze worden samengevat in Tabel 49.

	Waarde
Batterij (kWh)	950
Bereik (km)	525
Capex (€ per stuk)	407.000
Opex (€ per km)	0,135
Levensduur	10

Tabel 49 Kosten en overige kenmerken van de batterij elektrische truck.

Scenario met uitsluitend gebruik van PV en een beperkte vloot

Om een vergelijking te kunnen maken met waterstoftrucks zullen twee scenario's voor het rijden met batterij elektrische trucks worden onderzocht die eerder in dit onderzoek gebruikt zijn. Het eerste scenario betreft de situatie waarbij uitsluitend gebruik wordt gemaakt van de elektriciteit die wordt opgewekt door een pv-park met een capaciteit van 1 MW. Er is dus sprake van een beperkte vloot waarbij de beschikbare elektriciteit de omvang van de vloot zal bepalen. Omdat de vrachtwagens het hele jaar moeten kunnen rijden zal er ook behoefte aan opslag ontstaan. Ook het feit dat de vrachtwagens overdag rijden en 's avonds laden maakt opslag noodzakelijk.

Het National Renewable Energy Laboratory heeft in 2021 een studie gepubliceerd waarin de resultaten van 13 andere publicaties over batterijopslag worden vergeleken (105). De kosten van een batterij voor opslag wordt geschat op € 314 per kWh (105) (106). Verdere relevante parameters worden als volgt ingeschat: de roundtrip efficiëntie is 85%, de onderhoudskosten zijn 2,5% van de kosten per kW en de levensduur bedraagt 15 jaar. In de toelichting op de onderhoudskosten wordt gesteld dat de onderhoudskosten hoog zijn maar ertoe leiden dat de batterij gedurende de levensloop haar vermogen en capaciteit behoudt. De degradatie van de batterij wordt dus verrekend met hogere onderhoudskosten.

Voor wat betreft de batterij zal in dit onderzoek in eerste instantie worden uitgegaan van de gegevens zoals deze worden samengevat in Tabel 50.

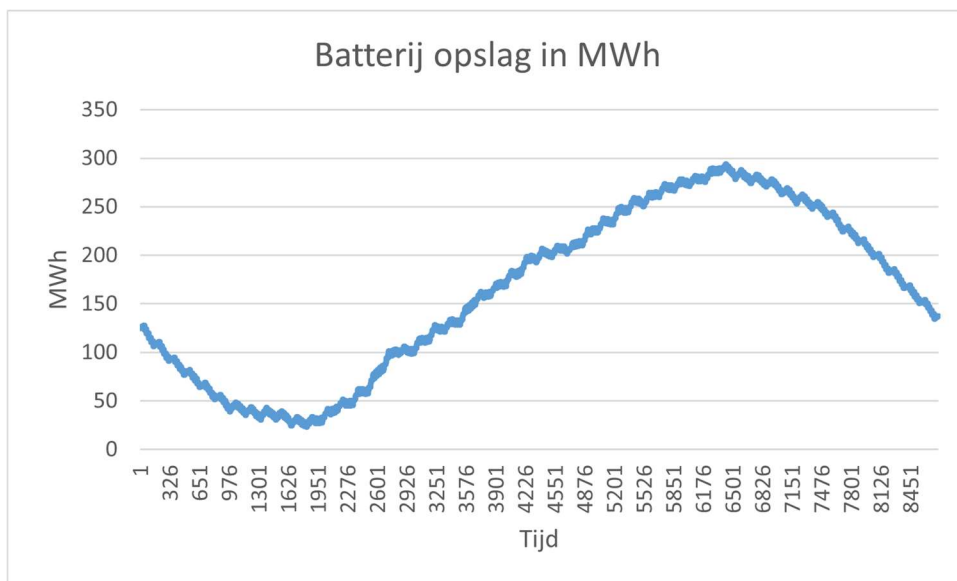
	Waarde
Batterij (€/kWh)	314
Efficiëntie (procent)	85
Levensduur	15
Onderhoud (% van capex)	2,5

Tabel 50 Kosten en kenmerken van batterijopslag.

Het scenario met een beperkte vloot en het uitsluitend gebruiken van pv.

De capaciteit van het pv-park wordt in dit scenario als uitgangspunt genomen. De in een jaar geproduceerde elektriciteit is op basis van de besproken gegevens betreffende de chargers, de batterij en de trucks voldoende om 11 batterij elektrische trucks een jaar lang te laten rijden. De trucks rijden 5 dagen per week en 187,5 km per dag net zoals in het vergelijkbare scenario voor de waterstoftrucks.

De capaciteit van de batterij wordt bepaald op basis van de opslagbehoefte. Op de door het pv-park geproduceerde elektriciteit kunnen 11 batterij elektrische trucks een jaar rijden. Hiervoor is het noodzakelijk om gedurende het gehele jaar de trucks op te kunnen laden.



Figuur 14 Batterij opslag in MWh bij uitsluitend gebruik van PV.

Figuur 14 laat de opslagbehoefte zien van het scenario waarbij 11 batterij elektrische trucks uitsluitend worden opgeladen met elektriciteit van een pv-park. Het valt op dat voor een relatief bescheiden vloot van 11 trucks er een zeer grote (300 MWh) en kostbare batterij nodig is.

Van dit scenario is een kostenbatenanalyse opgesteld. Hierbij is uitgegaan van de gegevens zoals deze in dit hoofdstuk zijn besproken. De opex in Tabel 51 betreffen de netto contante waarde van de operationele kosten over een periode van 15 jaar.

	Capex	Opex
PV	€ 565.000	€ 61.926
Batterij	€ 94.200.000	€ 22.872.346
Chargers	€ 303.050	€ 41.047
eTrucks	€ 4.477.000	€ 226.058
Totaal	€ 99.545.050	€ 61.926

Tabel 51 Capex en Opex batterij elektrische voertuigen, uitsluitend PV en een beperkte vloot.

Uit Tabel 51 blijkt duidelijk dat de batterijopslag een onevenredig dure oplossing is om het seizoenseffect tegen te gaan. Zowel de capex als de opex bestaan hoofdzakelijk uit de kosten die worden gemaakt voor de aanschaf, het onderhoud en de degradatie van de batterij. De contant gemaakte kosten per kilometer komen volgens dit model neer op € 29 hetgeen duidelijk maakt dat dit scenario niet praktisch relevant is. Wel kan worden geconcludeerd dat voor batterij elektrisch rijden op uitsluitend hernieuwbare elektriciteit het gebruiken van het elektriciteitsnetwerk noodzakelijk is.

Batterij elektrische trucks bij gebruik van het elektriciteitsnet en een uitgebreide vloot.

Om een goede vergelijking met het rijden op waterstof te kunnen maken zal bij dit scenario uit worden gegaan van de volgende configuratie. De vloot bestaat uit 39 vrachtwagens en 20 chargers met een vermogen van 50 kW. Voor het opladen wordt verondersteld dat de chargers geconcentreerd zijn op bepaalde locaties. De locatie kan een tankstation zijn of het terrein van een

transportonderneming. Er wordt nu eerst onderzocht wat de gevolgen zijn van deze laadinfrastructuur voor de belasting van het elektriciteitsnet.

Kosten verzwarend elektriciteitsnet.

De gevolgen van een zwaardere belasting van het elektriciteitsnet zijn afhankelijk van de specifieke situatie. Zoals eerder besproken in de paragraaf *Effecten op macroniveau* publiceert Tennet de capaciteitskaart van het elektriciteitsnet van Nederland. Op veel plaatsen is het net vol en kunnen nieuwe aansluitingen momenteel niet worden gerealiseerd. Op andere plaatsen is nog wel aansluitruimte.

Netbeheer Nederland bespreekt in het document Basisinformatie over energie-infrastructuur (7) onder andere kengetallen betreffende de kosten van elektriciteitsstations en -kabels. Een MS/LS station kan een vermogen hebben tussen de 0,2 en 1,0 MVA. De spreiding van het kengetal voor de kosten van een dergelijk station is € 35.000 - € 250.000. Twintig chargers van 50 kW hebben een station nodig met een capaciteit van 1,0 MVA. De kosten van het station voor de oplaadlocatie worden dus geschat op € 250.000. De kosten van de kabels volgens dezelfde bron bedragen tussen de € 70 en € 150 per meter. Het hangt af van de locatie en de opstelling hoeveel kabel er nodig is. Netbeheer Nederland gaat uit van een kilometer kabel voor de aanleg van een nieuw MS/LS station. Voor deze studie wordt daarom uitgegaan van 1 kilometer kabel voor € 100 per meter. Het totaal aan kosten voor de kabel bedraagt dan € 100.000.

Elektriciteit

Om 39 batterij-elektrische vrachtwagens het hele jaar te laten rijden is de productie van het zonnepark met een piekcapaciteit van 1 MW niet voldoende. Er zal daarom net als bij het scenario voor waterstofvrachtwagens met een uitgebreide vloot elektriciteit van het net moeten worden ingekocht. Bij een afstand van 187,5 km per truck en vijf operationele dagen per week bedraagt de totale vraag naar elektriciteit 4.431 MWh. Van deze vraag zal 1.295 MWh worden geleverd door het zonnepark, de overige elektriciteit wordt via het net ingekocht en afgenomen. Voor ieder uur in het jaar is daarom bepaald hoeveel extra elektriciteit er moet worden ingekocht om de vrachtwagens op te kunnen laden. De kosten van deze elektriciteit zijn bepaald met behulp van de door het PBL gepubliceerde verwachtingen in de nationale klimaat- en energieverkenning (52). De transportkosten bedragen € 6,20 per MWh (46) en de certificaten voor de garantie van oorsprong worden geschat op € 2 per MWh (47).

Batterij of salderen

De elektriciteit van de zonnepanelen wordt gedurende de dag geproduceerd. Ervan uitgaande dat de batterij-elektrische vrachtwagens 's avonds moeten worden opgeladen moet de stroom worden opgeslagen of teruggeleverd aan het net (salderen). Het zonnepark produceert op haar meest productieve dagen iets meer dan 7 MWh. De kosten van een batterij met deze capaciteit bedragen bijna 2,2 mln euro, uitgaande van de eerder genoemde 314 €/kWh als CAPEX kosten voor een batterij. Indien een salderingsregeling van kracht is dan is een batterij niet nodig in het systeem, de pv-stroom kan dan eerst worden teruggeleverd en worden verrekend met het verbruik. De huidige salderingsregeling is tot 2025 van kracht³⁰, er is een wetsvoorstel om de regeling vervolgens tot 2031

³⁰

<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/beleidsnotas/2022/07/01/beslisnota/beslisnota.pdf>

stapsgewijs af te bouwen³¹. In dit onderzoek wordt vanwege de voorgenomen afschaffing van de salderingsregeling ervan uitgegaan dat de overdag geproduceerde zonnestroom moet worden opgeslagen zodat de batterij-elektrische vrachtwagens 's avonds en 's nachts kunnen worden geladen.

Waterstof-elektrisch rijden versus batterij-elektrisch rijden.

Tabel 52 toont de CAPEX en OPEX voor een vloot van 39 waterstof-elektrische en batterij-elektrische vrachtwagens. De bedragen zijn de contante waarde over een periode van 15 jaar.

Waterstof-elektrisch			Batterij-elektrisch		
Kosten			Kosten		
CAPEX			CAPEX		
PV	€	470.698	PV	€	470.698
Electrolyser	€	1.343.526	Netverzwaring en batterij	€	2.636.502
Vervanging stack	€	685.468	Chargers	€	725.126
Compressor	€	157.239	eTrucks	€	21.424.776
Tube trailer	€	177.603			
Opslag	€	-			
Tankstation	€	1.585.029			
Vrachtwagens	€	26.879.311			
Bestelbussen	€	-			
		€ 31.298.873			€ 25.257.103
OPEX			OPEX		
Elektriciteit voor productie H2	€	3.672.347	PV	€	61.926
Transportkosten netwerk	€	493.088	Elektriciteit grid	€	1.646.033
Kosten GVO	€	159.061	Transportkosten netwerk	€	221.014
Compressie	€	266.007	Kosten GVO	€	71.295
transport	€	570.151	Chargers	€	41.047
Chauffeur	€	779.504	eTrucks	€	2.813.193
Elektriciteit tankstation	€	146.821	Batterij	€	626.525
Onderhoud:					
PV	€	61.926			
Electrolyser	€	657.624			
Compressor	€	68.936			
Tube trailer	€	32.881			
Tankstation	€	975.476			
Opbrengst waterstof	€	-88.631			
Onderhoud vrachtwagens	€	3.855.117			
		€ 11.650.308			€ 5.481.033
Totaal		€ 42.949.182			€ 30.738.136

Tabel 52 CAPEX en OPEX voor een vloot van 39 waterstof-elektrische en batterij-elektrische vrachtwagens, contante waarde voor 15 jaar.

Met een vloot van 39 vrachtwagens kan de electrolyser volledig worden benut. De geproduceerde waterstof wordt vervoerd naar het tankstation en uitgaande van 5 werkdagen per week en 185 kilometer per werkdag wordt bijna alle waterstof door de vrachtwagens gebruikt. Het restant wordt als inkomsten tegen kostprijs verrekend. De batterij-elektrische vrachtwagens worden 's avonds geladen. De stroom van het pv-park wordt overdag opgeslagen in een batterij. Er is één laadpaal beschikbaar per twee vrachtwagens.

³¹ <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/10/08/wetsvoorstel-afbouw-salderingsregeling-naar-de-kamer>

De eerste conclusie die getrokken kan worden uit Tabel 52 is dat de totale kosten van de waterstof-elektrische variant € 12 mln hoger is (34%). De eerste oorzaak hiervan zijn de hogere kosten van de vrachtwagens (€ 5 mln). Dit verschil wordt op haar beurt weer veroorzaakt door de wat hogere aanschafprijs per vrachtwagen en door de verschillende levensduur (8 jaar versus 10 jaar). De tweede oorzaak waarom de waterstof-elektrische variant hogere kosten kent is de extra elektriciteit (€ 2,4 mln inclusief transportkosten netwerk en GVO) die nodig is voor de waterstofproductie. De verliezen bij de electrolyse, de compressie en de brandstofcel zorgen voor een lagere efficiency in de waterstofketen en dit veroorzaakt de grotere behoefte aan elektriciteit.

		Huidige kosten	Projectie met sterke kostendaling	Projectie met medium kostendaling
CAPEX	Vrachtwagen H2 (€)	€ 437.525	€ 126.000	€ 250.000
	Vrachtwagen batterij (€)	€ 407.000	€ 126.000	€ 250.000
	Electrolyser (€/kw)	€ 1.500	€ 800	€ 800
	Electrolyser efficiency (%)	60	67	67
TCO	Vrachtwagen H2 (€/jr)	€ 73.415	€ 36.914	€ 49.937
	Vrachtwagen batterij (€/j)	€ 52.544	€ 27.396	€ 38.554
LCOD	Vrachtwagen H2 (€/km)	€ 2,33	€ 1,17	€ 1,58
	Vrachtwagen batterij (€/km)	€ 1,66	€ 0,87	€ 1,22

Tabel 53 TCO en LCOD van waterstofvrachtwagen en batterijvrachtwagen bij huidige en geprojecteerde kosten van electrolyser en voertuig.

Tabel 53 toont de TCO en LCOD van een waterstofvrachtwagen en een batterijvrachtwagen uitgaande van de in dit onderzoek besproken kosten. De batterijvrachtwagen kent lagere kosten, zowel wat betreft de TCO als wat betreft de LCOD. Ook wordt een projectie gegeven van de verwachte TCO en LCOD bij een sterke of medium kostendaling van de electrolyser en van het voertuig.

De LCOD van een dieselvrachtwagen opererend onder dezelfde veronderstellingen zijn niet bekend. In het onderzoek Kostencalculaties in het beroepsgoederenvervoer over de weg (51) worden voor diverse vormen van vrachtautovoer kostencalculaties gemaakt. Wanneer voor de trekker met oplegger wordt gekeken naar de kostenonderdelen die ook in dit onderzoek worden meegenomen ontstaat het beeld zoals is te zien in Tabel 54.

Kosten	
Afschrijving	€ 15.388
Rente	€ 1.450
Banden	€ 3.024
Brandstof	€ 27.994
Reparatie en onderhoud	€ 6.086
Totaal	€ 53.942
Kilometer (per jaar)	78.000
Kosten/km	€ 0,69

Tabel 54 Jaarlijkse kosten dieselveertuig trekker plus oplegger bij een kilometrage van 78.000 km.

Opgemerkt moet worden dat de kosten per kilometer voor de dieselvrachtwagen niet zonder meer kunnen worden vergeleken met de LCOD uit Tabel 53. LCOD betreft de kosten per kilometer voor een periode van de komende 15 jaar, waarbij de LCOD constant blijft. De kosten per kilometer à € 0,69 voor het dieselveertuig zijn de kosten voor het jaar 2018. In Bijlage 6 wordt op basis van dezelfde gegevens de LCOD van een dieselvrachtwagen bepaald waarbij wordt uitgegaan van 2% inflatie en een discontovoet van 6%. Onder deze veronderstellingen is de LCOD van een dieselvrachtwagen €

0,84. Dit is lager dan de alternatieven maar de niet monetaire effecten zijn bij dit bedrag niet inbegrepen.

Overige effecten

De batterij-elektrische truck en de waterstof-elektrische truck hebben niet hetzelfde bereik. Zoals besproken heeft een batterij-elektrische truck op dit moment een verwacht bereik van 525 kilometer gebaseerd op een batterijcapaciteit van 950 kWh en een verbruik van 1,8 kWh per kilometer. De Hyzon Class 8 is een waterstoftruck met een bereik van 800 kilometer indien gekozen wordt voor de grootste waterstoftank³².

Er is bovendien een verschil in oplaadtijd respectievelijk tanktijd. Tabel 55 laat de oplaadtijd zien van de batterij-elektrische truck bij verschillende vermogens van de gebruikte laadpaal. Het gaat hierbij om het volledig laden van de batterij, in de praktijk zal de batterij nooit volledig leeg worden gereden. De Hyzon Class 8 kan in 15 minuten worden volgetankt.

Vermogen laadpaal (in kW)	Laadtijd (in uren:minuten)
50	19:00
150	6:20
350	2:42

Tabel 55 Laadtijd van een batterij van 950 kWh bij verschillende laadpaalvermogens.

De combinatie van bereik en oplaadtijd is bepalend voor de wijze waarop de vrachtwagen kan worden ingezet. Dit zal verschillen per bedrijf, per vrachtwagen en per rit. Hierbij moet ook nog rekening worden gehouden met de rijtijdenwet. Deze bepaalt dat de maximaal ononderbroken rijtijd 4,5 uur bedraagt waarna 45 minuten pauze moet volgen. Vervolgens mag nogmaals maximaal 4,5 uur worden gereden³³. De pauze kan worden benut om gedeeltelijk op te laden of om waterstof te tanken. Uitgaande van een laadpaalvermogen van 350 kW kan er in 45 minuten 263 kWh worden geladen. Dit is gelijk aan een bereik van 145 km.

Er kunnen op basis van het bereik en de laadtijd drie verschillende situaties worden onderscheiden:

1. Indien het bereik van de vrachtwagen niet groter hoeft te zijn dan 525 kilometer dan zijn bereik en oplaadtijd geen beperkende factor in de keuze. De batterij elektrische en de waterstof-elektrische vrachtwagen voldoen beide aan de gestelde eisen.
2. Indien het bereik van de vrachtwagen niet groter hoeft te zijn dan 670 kilometer dan kan de batterij-elektrische vrachtwagen dit realiseren indien de batterij tijdens de chauffeurspauze wordt bijgeladen. Overigens zullen de kilometrages in de praktijk lager zijn omdat de batterij niet volledig leeg zal worden gereden.
3. Indien het bereik van de vrachtwagen groter moet zijn dan 670 kilometer kan de batterij-elektrische vrachtwagen volgens de eerder gestelde specificaties daar niet aan voldoen. Voor langere afstanden is de waterstof-elektrische vrachtwagen daarom meer geschikt. Het bereik is groter en de vrachtwagen kan in 15 minuten worden getankt. Uiteraard moet daarvoor wel de infrastructuur aanwezig zijn.

De gemiddelde afgelegde afstand van een trekker met oplegger in Nederland is ongeveer 78.000 kilometer per jaar. Een deel van de vloot rijdt tussen de 90.000 en 160.000 kilometer per jaar (97). Het is op dit moment nog niet duidelijk in welke mate het bereik en de oplaadtijd een bepalende

³² <https://www.hyzonmotors.com/vehicles/hyzon-class-8>

³³ <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/werktijden/vraag-en-antwoord/rijtijden-en-rusttijden-wegvervoer>

factor zullen zijn bij de keuze tussen batterij-elektrische en waterstof-elektrische trucks. Dit komt voornamelijk doordat er nog te weinig zero-emissie trucks op de weg zijn en de gegevens over de prestaties nog ontbreken.

Een veel gereden traject voor vrachtwagens loopt van de Rotterdamse haven naar het Duitse Ruhrgebied. De afstand vanaf Rotterdam naar bijvoorbeeld Dortmund of Leverkusen is ruim 250 kilometer enkele reis. Batterij-elektrische vrachtwagens zullen dit moeten kunnen rijden, ook in de winter met een zware lading. Er zijn nog onvoldoende gegevens beschikbaar om te stellen of dit nu of in de nabije toekomst mogelijk is. In algemene zin kan worden gesteld dat waterstof-elektrische vrachtwagens meer mogelijkheden bieden op de langere afstand. Hoe groot het aandeel van het vrachtvervoer is waar dit voordeel van belang wordt, is nog niet duidelijk.

Schaarse materialen.

Zoals eerder besproken wordt bij het produceren van PEM electrolyzers gebruik gemaakt van de schaarse elementen platina en iridium. Voor de productie van batterijen zijn lithium, mangaan, grafiet en nikkel de elementen die gebruikt worden voor de productie en die worden gezien als schaars. De Europese commissie herzielt elke drie jaar een lijst met daarop de kritieke grondstoffen. Daarnaast presenteert de commissie een prognose-onderzoek waarbij wordt gekeken naar het economisch belang en het voorzieningsrisico. De informatie wordt gepubliceerd in het Raw Materials Information System³⁴. De commissie noemt met name lithium als een element waaraan op korte termijn tekorten kunnen ontstaan³⁵. Ook de markt voor mangaan, grafiet en nikkel wordt verwacht krap te zijn.

³⁴ <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>

³⁵ <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>

13. Discussie en conclusies

Dit onderzoek betreft een maatschappelijke kosten-batenanalyse van waterstof-elektrisch rijden. Het onderzoek is onderdeel van het H2Grow-project waarbij een volledig groene waterstofketen voor mobiliteit is gerealiseerd. De keten bestaat uit een 1 MW PV-park, een 1 MW electrolyser, een waterstofvulstation in Groningen en 4 waterstof-elektrische vrachtwagens en 8 waterstof-elektrische bestelbussen.

Voor dit onderzoek zijn drie projectvarianten geanalyseerd. Voor de eerste variant wordt uitgegaan van de voertuigen van het project en productie van waterstof uitsluitend met elektriciteit afkomstig van het PV-park (beperkte vloot en uitsluitend PV). Bij de tweede variant wordt ook elektriciteit van het elektriciteitsnet gebruikt (beperkte vloot met PV en net). Bij de derde variant wordt uitgegaan van 38 vrachtwagens en 8 bestelbussen (uitgebreide vloot met PV en net). De volgende conclusies kunnen worden getrokken.

- *Bij volledige benutting van de electrolyser en het tankstation bedragen de LCOH € 8,24.*

Bij uitsluitend gebruik van PV is de conclusie dat de lage benutting van de elektrolyser, de lage benutting van het tankstation en de behoefte aan waterstofopslag vanwege de seizoensverschillen leiden tot hoge productie- en distributiekosten per kilogram waterstof. De LCOH bedragen voor deze variant € 27,38 per kg. Bij gebruik van PV en het elektriciteitsnet en een beperkte vloot dalen de productiekosten van waterstof omdat de elektrolyser beter wordt benut en de behoefte aan opslag vermindert. De beperkte vloot veroorzaakt nog steeds een lage benutting van het tankstation en dus tot hoge kosten per kilogram. De LCOH bedragen nu € 20,40. Bij gebruik van PV en het elektriciteitsnet en een uitgebreide vloot worden de elektrolyser en het tankstation goed benut. De LCOH bedragen nu € 8,24. De eerste conclusie is dat bij de productie van waterstof het vanuit het kostenperspectief gunstig is om elektriciteit van het net af te nemen en niet uitsluitend een PV-park te gebruiken. Een tweede conclusie is dat de vaste kosten van een tankstation tot hoge kosten per kilogram waterstof leiden bij een lage bezetting. Dit zal bij een geleidelijke groei van het aantal waterstofvoertuigen de exploitatie van waterstoftankstations in de eerste fase bemoeilijken.

- *Alleen produceren bij lage stroomprijzen resulteert in hogere LCOH vanwege de lage benutting van de electrolyser.*

Bij gebruik van PV en het elektriciteitsnet is onderzocht of het mogelijk is om de kosten per kilogram waterstof te verlagen door op de duurste uren geen stroom in te kopen (peak shaving). Uit analyse blijkt dat het vermijden van de pieken in de stroomprijs inderdaad een zeer kleine invloed heeft op de gemiddelde kostprijs per kg waterstof. Door bijvoorbeeld een maximumprijs in te stellen van € 130 per MWh worden er enkele kilo's minder waterstof geproduceerd. De kostprijs per kg waterstof zakt een fractie, bij afronding op twee decimalen zou het verschil niet zichtbaar zijn. Door een nog lagere maximumprijs per MWh te hanteren wordt er vaker geen stroom ingekocht. De totale productie daalt hierdoor en de kostprijs per kg waterstof begint te stijgen. De oorzaak is dat de vaste kosten over een kleiner volume moet worden verdeeld. De variabele kosten blijven dalen, deze bestaan voornamelijk uit de elektriciteitskosten dus goedkopere stroom resulteert in lagere variabele kosten. De conclusie luidt dat het optimaliseren van het aantal operationele uren van de elektrolyser resulteert in de laagste kostprijs per kg waterstof. De elektrolyser beperkt inzetten wanneer de stroomprijzen laag zijn leidt niet tot lagere kosten per kg. Dit staat haaks op de visie dat de productie van waterstof vooral met overschotten van (zon- en wind)elektriciteit moet worden gedaan. Door alleen overschotten te

gebruiken zal het aantal operationele uren laag zijn en de kosten van de geproduceerde waterstof hoog.

- *De TCO per jaar voor een waterstofvrachtwagen is gelijk aan ruim € 73.000 en de LCOD € 2,33. In de toekomst daalt dit dankzij schaalvoordelen mogelijk naar een TCO van € 37.000 per jaar en een LCOD van € 1,17.*

Uit de maatschappelijke kosten-batenanalyse blijkt dat de TCO per jaar voor een waterstofvrachtwagen gelijk is aan ruim € 73.000 en de LCOD € 2,33. Deze bedragen omvatten alle kapitaal- en onderhoudskosten maar zijn exclusief de chauffeurskosten. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de prijs van de waterstofvrachtwagen, de kosten van de elektrolyser en de elektrolyser efficiency grote invloed hebben op de resultaten. Bij een daling van deze factoren in lijn met de (optimistische) verwachting volgens de literatuur wordt een TCO van € 37.000 per jaar en een LCOD van € 1,17 mogelijk. De toekomstige prijs van de waterstofvrachtwagen hangt met name af van de mate waarin schaalvoordelen kunnen worden gerealiseerd. Een analyse van de kosten van de verschillende componenten suggereert dat een waterstofvrachtwagen in de toekomst niet veel duurder hoeft te zijn dan een dieselvrachtwagen.

- *De CO2 reductie van een waterstofvrachtwagen is gelijk aan 32 ton per jaar. De monetaire waarde hiervan kan worden geschat tussen € 960 en € 2.272.*

De maatschappelijke kosten-batenanalyse gaat ook in op de niet-monetaire effecten. In de eerste plaats kan met een waterstofvrachtwagen CO2 uitstoot worden vermeden. In dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat een waterstofvrachtwagen jaarlijks 32 ton CO2 uitstoot bespaard, waarbij de waterstof met groene energie moet zijn geproduceerd. De gemiddelde CO2-prijs in 2020 volgens de European Energy Exchange (EEX) was € 30/ton CO. Wanneer de maatschappelijke waarde van deze CO2-reductie in geld wordt uitgedrukt op basis van deze waarde dan kan een reductie van 32 ton CO2 gelijk worden gesteld aan een bate van € 960. De huidige CO2-prijs op de EEX is gelijk aan € 71 per ton, het is de vraag of de CO2-prijzen in de toekomst gelijk zullen blijven aan het huidige hogere niveau.

- *Het werkgelegenheidseffect van het project met een uitgebreide vloot wordt geschat op een netto contante waarde van € 5 mln.*

De transitie van diesel- naar waterstofvrachtwagens kent ook werkgelegenheidseffecten. Deze worden veroorzaakt door werkgelegenheid in de waterstofproductieketen en in de productie van de waterstofvrachtwagens. In de waterstofproductieketen gaat het voornamelijk om installatie- en onderhoudswerkzaamheden. Bij de productie van waterstofvrachtwagens gaat het om additionele arbeid in vergelijking met de vrachtwagens die anders zouden zijn geïmporteerd. Voor de projectvariant met een uitgebreide vloot wordt het werkgelegenheidseffect geschat op een netto contante waarde van € 5 mln.

- *Waterstofvrachtwagens kunnen in de zero-emissie zones opereren, dieselveertuigen zijn hier vanaf 2025 niet meer toegestaan.*

Een belangrijke bate voor waterstof-elektrisch rijden in vergelijking met diesel is de toegang tot de binnensteden in Nederland vanaf 2025 en 2030 die zullen gelden als zero-emissie zone. Deze factor is moeilijk te kwantificeren. Het is onbekend hoeveel vrachtwagens nooit in de binnenstad

rijden. Voor deze vrachtwagens heeft de zero-emissie zone geen gevolgen. Voor vrachtwagens die wel in de binnenstad rijden wordt in de toekomst mogelijk gebruik gemaakt van stadsdistributiecentra (69) waar vrachtwagens hun lading lossen en elektrische voertuigen de zogeheten “last mile” van de bezorging uitvoeren. Dit zijn dan extra kosten voor dieselvrachtwagens. Toegang tot zero-emissie zones moet worden gezien als een positieve baten.

- *Veiligheidsmaatregelen en vergunningsaanvragen brengen additionele kosten met zich mee.*

De kosten van veiligheidsmaatregelen en vergunningsaanvragen zijn pro memoria genoteerd en niet gemonetariseerd. Garages zullen moeten voldoen aan veiligheidsvoorwaarden die vergelijkbaar zijn met de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 26 voor CNG en LNG. Vergunningsaanvragen kunnen vertraging oplopen doordat veel gemeenten nog geen expertise hebben op het gebied van bijvoorbeeld waterstoftankstations.

- *De productie van electrolyzers en brandstofcellen vergroot de vraag naar de schaarse materialen platina en iridium.*

De vraag naar schaarse materialen is een negatief effect maar wordt in dit onderzoek niet gemonetariseerd. De productie van electrolyzers en brandstofcellen veroorzaakt een behoefte aan schaarse materialen. Het gaat daarbij met name om platina en iridium.

- *Het aansluiten van electrolyzers op windturbines of PV-parken met behulp van een directe lijn kan de druk op het elektriciteitsnet verminderen.*

Electrolyzers kunnen het elektriciteitsnet belasten wat kan leiden tot extra kosten voor het elektriciteitsnet. De toekomstige kosten van eventuele verzwaring van het netwerk zullen afhangen van de wijze waarop de waterstofproductie plaats gaat vinden. Indien het beslag op de transportcapaciteit van het elektriciteitsnet moet worden beperkt, is het gebruiken van electrolyzers direct bij de windturbines en zonneparken een goede manier om extra netwerkcosten te vermijden.

- *Het ontstaan van een waterstoftransportnet kan de kosten van waterstofmobiliteit verlagen, de ontwikkeling van waterstofmobiliteit kan het ontstaan van een waterstoftransportnet bevorderen.*

Een nationaal waterstoftransportnet kan de kosten van waterstofmobiliteit verlagen. In deze maatschappelijke kosten-batenanalyse wordt uitgegaan van het gebruik van tubetrailers om waterstof naar het tankstation te vervoeren. Indien waterstof via het netwerk tegen hetzelfde tarief kan worden getransporteerd als aardgas dan verbetert de kosten-batenanalyse voor waterstofmobiliteit. Tegelijkertijd zal de vraag naar waterstof vanuit de mobiliteitssector de toegevoegde waarde van een waterstoftransportnet vergroten.

- *De kosten bij batterij-elektrisch rijden zijn lager dan bij waterstof-elektrisch rijden.*

De TCO van een waterstofvrachtwagen zijn € 73.415 per jaar en de LCOD € 2,33 per kilometer. Voor een batterij-elektrische vrachtwagen is dit € 52.544 respectievelijk € 1,66. Het is de verwachting dat beide soorten vrachtwagens deze kosten bij opschaling zullen dalen. In een

gunstig scenario bedragen de TCO € 36.914 voor waterstof en € 27.396 voor batterij-elektrisch. De LCOD zijn dan naar verwachting € 1,17 en € 0,87.

- *Voor langere afstanden en zwaarder transport biedt waterstof-elektrisch rijden meer mogelijkheden dan batterij-elektrisch rijden.*

Er kunnen op basis van het bereik en de laadtijd drie verschillende situaties worden onderscheiden. Indien het bereik van de vrachtwagen niet groter hoeft te zijn dan 525 kilometer dan zijn bereik en oplaadtijd geen beperkende factor in de keuze. De batterij elektrische en de waterstof-elektrische vrachtwagen voldoen beide aan de gestelde eisen. Indien het bereik van de vrachtwagen niet groter hoeft te zijn dan 670 kilometer dan kan de batterij-elektrische vrachtwagen dit realiseren indien de batterij tijdens de chauffeurspauze wordt bijgeladen. Overigens zullen de kilometrages in de praktijk lager zijn omdat de batterij niet volledig leeg zal worden gereden. Indien het bereik van de vrachtwagen groter moet zijn dan 670 kilometer kan de batterij-elektrische vrachtwagen volgens de eerder gestelde specificaties daar niet aan voldoen. Voor langere afstanden is de waterstof-elektrische vrachtwagen daarom meer geschikt. Het bereik is groter en de vrachtwagen kan in 15 minuten worden getankt. Uiteraard moet daarvoor wel de infrastructuur aanwezig zijn.

Referenties

1. **United Nations.** Adoption of the Paris agreement. <https://unfccc.int>. [Online] 21 05 2019. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
2. **UNFCCC.** Glasgow Climate Pact. <https://unfccc.int/>. [Online] 13 11 2021. [Citaat van: 08 09 2022.] https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf.
3. **Klimaatberaad.** <https://www.klimaatakkoord.nl/>. [Online] 10 07 2018. [Citaat van: 21 05 2019.] <https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2018/07/10/hoofdlijnen-compleet>.
4. **Wiebes, e.d.** . Kabinetsvisie waterstof. <https://www.tweedekamer.nl/>. [Online] 30 03 2020. [Citaat van: 19 08 2022.] https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2020Z05793&did=2020D12101.32813-485.
5. **Romijn, Gerbert en Renes, Gusta.** *Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse*. Den Haag : De Swart, 2013. ISBN: 978-90-5833-619-4.
6. **European Commission.** Energy roadmap 2050. <https://ec.europa.eu/energy/>. [Online] 2012. [Citaat van: 21 05 2019.] https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf.
7. **Netbeheer Nederland.** Basisinformatie over energie-infrastructuur. <https://www.netbeheernederland.nl>. [Online] 15 03 2019. [Citaat van: 21 05 2019.] https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Basisdocument_over_energie-infrastructuur_143.pdf.
8. **Gemeente Groningen.** Routekaart Groningen CO2-neutraal 2035. <https://gemeente.groningen.nl>. [Online] 08 2018. [Citaat van: 21 05 2019.] <https://gemeente.groningen.nl/sites/default/files/Routekaart-Groningen-Energie-%28CO2---neutraal%29.pdf>.
9. **Bestuursakkoord.** Bestuursakkoord Zero Emissie Regionaal Openbaar Vervoer Per Bus. www.ipo.nl. [Online] 21 05 2019. https://ipo.nl/files/7914/9422/8241/Bestuursakkoord_Zero_OV-Bus_v3.pdf.
10. **Motorvoertuigenpark; type, leeftijdsklasse, 1 januari .** <https://opendata.cbs.nl>. [Online] CBS, 7 03 2019. [Citaat van: 28 05 2019.] <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82044NED/table?ts=1559042255874>.
11. **Elektrische bestelauto's in Nedreland – Marktontwikkelingen 2017-2025.** <https://topsectorlogistiek.nl>. [Online] 2018 08 2018. [Citaat van: 23 05 2019.] https://topsectorlogistiek.nl/wptop/wp-content/uploads/2018/09/TNO-2018-P10518v2_-EINDrapportage-E-van-Elektrische-bestelautos.pdf.
12. **Marktverkenning elektrische bussen.** <https://www.elaad.nl>. [Online] 15 11 2017. [Citaat van: 28 05 2019.] https://www.elaad.nl/uploads/downloads/downloads_download/ElaadNL_Marktverkenning_Elektrische_Bussen_november_2017.pdf.

13. Achtergrondrapport carbontax-model. <https://www.pbl.nl>. [Online] 13 03 2019. [Citaat van: 28 05 2019.] <https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Revnext-Achtergrondrapport-Carbontax-model.pdf>.
14. Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's. <https://www.wlo2015.nl>. [Online] 2015. [Citaat van: 28 05 2019.] https://www.wlo2015.nl/wp-content/uploads/PBL_2015_WLO_Nederland-in-2030-en-2050_1558.pdf.
15. Actieagenda wegverkeer elektrisch vervoer. <https://nederlandelektrisch.nl>. [Online] [Citaat van: 28 05 2019.] <https://nederlandelektrisch.nl/u/files/2015-01-actieagenda-ev.pdf>.
16. Refa, Nazir, Hammer, Daan en Rookhuijzen, Jan van. www.elaad.nl. *Outlook 2021*. [Online] Oktober 2021. [Citaat van: 04 03 2022.] https://www.elaad.nl/uploads/files/2021Q3_Elaad_Outlook_Personenautos_2050.pdf.
17. agendalaadinfrastructuur.nl. *agendalaadinfrastructuur.nl*. [Online] NAL. [Citaat van: 04 03 2022.] <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/default.aspx>.
18. Transport en mobiliteit 2016. <https://www.cbs.nl>. [Online] juni 2016. [Citaat van: 29 05 2019.] <https://www.cbs.nl/nl-nl/publicatie/2016/25/transport-en-mobiliteit-2016>.
19. ANWB. Elektrisch rijden monitor 2021. <https://www.anwb.nl>. [Online] December 2021. [Citaat van: 08 09 2022.] <https://www.anwb.nl/binaries/content/assets/anwb/pdf/auto/themas/elektrisch-rijden/elektrisch-rijden-monitor/anwb-elektrisch-rijden-monitor-2021-anwb-infographic>.
20. Commercial electric vehicles. <https://www.rvo.nl>. [Online] September 2018. [Citaat van: 22 05 2019.] <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/02/2018-09%20Commercial%20Electric%20Vehicles.pdf>.
21. De milieuprestatie van openbaar vervoer bussen en ontwikkelingen rondom elektrische openbaar vervoer bussen in Nederland. <https://www.rvo.nl>. [Online] juni 2018. [Citaat van: 23 05 2019.] https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/02/Milieuprestatie%20OV-bussen%20en%20ontwikkelingen%20elektrische%20OV-bussen_0.pdf.
22. Bestek concessie GD 2020. <https://www.tenderned.nl>. [Online] 04 12 2017. [Citaat van: 11 06 2019.] <https://www.tenderned.nl/tenderned-tap/aankondigingen/146520;section=2>.
23. Selectieleidraad levering waterstof t.b.v. openbaar vervoer concessie GD 2020. <https://www.tenderned.nl>. [Online] 02 10 2017. [Citaat van: 06 11 2019.] <https://www.tenderned.nl/tenderned-tap/aankondigingen/150311;section=2>.
24. Aanvraag omgevingsvergunning voor de verandering van de aardgasbuffer Zuidwending. <https://www.agbzw.nl>. [Online] 2018. [Citaat van: 29 05 2019.] [https://www.agbzw.nl/projecten/vergunningen-waterstofproject-2/\\$1037](https://www.agbzw.nl/projecten/vergunningen-waterstofproject-2/$1037).
25. Kostenonderzoek zonne-energie SDE+ 2018 (zon-PV vanaf 15 kWp en zonthermie vanaf 140 kW). <https://publicaties.ecn.nl/>. [Online] 06 04 2017. [Citaat van: 12 06 2019.] <https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-N--17-012>.
26. International Energy Agency. *World energy outlook 2016*, p. 450. Paris : International Energy Agency, 2016. 978-9-264-26494-6.

27. Lensink, Sander en Schoots, Koen. Eindadvies basisbedragen SDE++ 2021. *www.pbl.nl*. [Online] 31 05 2021. [Citaat van: 04 03 2022.] https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-eindadvies-basisbedragen-sde-plus-plus-2021_4032.pdf.
28. Study on early business cases for H2 in energy storage and more broadly power to H2 applications. <https://www.fch.europa.eu>. [Online] Juni 2017. [Citaat van: 12 06 2019.] https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/P2H_Full_Study_FCHJU.pdf.
29. Comparative analysis of infrastructures: hydrogen fueling and electric charging of vehicles. <https://www.researchgate.net>. [Online] 2018. [Citaat van: 12 06 2019.] https://www.researchgate.net/publication/322698780_Comparative_Analysis_of_Infrastructures_Hydrogen_Fueling_and_Electric_Charging_of_Vehicles. ISBN 978-3-95806-295-5.
30. Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. <https://www.iea.org>. [Online] 2015. [Citaat van: 12 06 2019.] <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>.
31. Hydrogenics. Cost reduction potential for electrolyser technology. <http://europeanpowertogas.com>. [Online] 06 18 2018. [Citaat van: 12 06 2019.] http://europeanpowertogas.com/wp-content/uploads/2018/06/20180619_Hydrogenics_EU-P2G-Platform_for-distribution.pdf.
32. Technologiebeoordeling van groene waterstofproductie. DNV GL. <https://www.enpuls.nl>. [Online] 2018. [Citaat van: 12 06 2019.] https://www.enpuls.nl/media/2345/eindrapport-module-1-_technologiebeoordeling-groene-waterstof-_enpuls.pdf.
33. Outlines of a Hydrogen Roadmap. <https://www.topsectorenergie.nl>. [Online] 05 2018. [Citaat van: 12 06 2019.] <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/publicaties/20180514%20Roadmap%20Hydrogen%20TKI%20Nieuw%20Gas%20May%202018.pdf>.
34. Christensen, A. <https://theicct.org/>. *Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe*. [Online] 18 06 2020. [Citaat van: 09 06 2021.] https://theicct.org/sites/default/files/publications/final_icct2020_assessment_of%20_hydrogen_production_costs%20v2.pdf.
35. E3. Hydrogen Opportunities in a Low-Carbon Future. <https://www.ethree.com/>. [Online] 06 2020. [Citaat van: 09 06 2021.] https://www.ethree.com/wp-content/uploads/2020/07/E3_MHPS_Hydrogen-in-the-West-Report_Final_June2020.pdf.
36. IEA TCP. Task 38 Final report. Power-to-Hydrogen and Hydrogen-to-X. <https://www.ieahydrogen.org/>. [Online] 09 2020. [Citaat van: 09 06 2021.] <https://www.ieahydrogen.org/task/task-38-power-to-hydrogen-and-hydrogen-to-x/>.
37. Lensink, S. *Eindadvies basisbedragen SDE++ 2020*. Den Haag : Planbureau voor de Leefomgeving, 2020. PBL-publicatienummer: 3526.
38. International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2021. *www.iea.org*. [Online] 10 2021. [Citaat van: 09 03 2022.] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abdae9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>.

39. Taibi, Emanuele en and others. Hydrogen from renewable power. *www.irena.org*. [Online] September 2018. [Citaat van: 11 03 2022.] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf. ISBN 978-92-9260-077-8.
40. Hydrogen production & distribution. *https://iea-etsap.org*. [Online] 02 2014. [Citaat van: 12 06 2019.] https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P12_H2_Feb2014_FINAL%203_CREES-2a-GS%20Mz%20GSOK.pdf.
41. Hydrogen compressor. *https://pureenergycentre.com/hydrogen-compressor/*. [Online] Pure energy centre. [Citaat van: 12 06 2019.] <https://pureenergycentre.com/hydrogen-compressor/>.
42. IRENA. Green hydrogen cost reduction. *https://irena.org/*. [Online] 2020. [Citaat van: 09 06 2021.] https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.
43. Hydrogen Fueling Stations Cost. */www.hydrogen.energy.gov/*. [Online] 02 11 2021. [Citaat van: 09 03 2022.] <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf>.
44. KNMI. *www.daggegevens.knmi.nl/*. *www.knmi.nl*. [Online] KNMI, 25 03 2022. [Citaat van: 25 03 2022.] <https://www.daggegevens.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens>.
45. <https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices>. <https://transparency.entsoe.eu>. [Online] ENTSOE. [Citaat van: 04 01 2022.] <https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices/show?name=&defaultValue=true&viewType=TABLE&areaType=BZN&atch=false&date.dateTime=20.08.2019+00:00|CET|DAY&biddingZone.values=CTY|10YNL-----L!BZN|10YNL-----L&dateTime.timez>.
46. <https://www.acm.nl/nl/publicaties/tarievenbesluit-enexis-elektriciteit-2021>. <https://www.acm.nl>. [Online] ACM, 25 03 2022. [Citaat van: 25 03 2022.] <https://www.acm.nl/nl/publicaties/tarievenbesluit-enexis-elektriciteit-2021>.
47. <https://wisenederland.nl/groene-stroom/prijslijst-garanties-van-oorsprong>. <https://wisenederland.nl/>. [Online] WISE, Oktober 2018. [Citaat van: 21 08 2019.] <https://wisenederland.nl/groene-stroom/prijslijst-garanties-van-oorsprong>.
48. PBL. Klimaat- en Energieverkenning 2020. *www.pbl.nl*. [Online] 2020. [Citaat van: 25 03 2022.] <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-klimaat-en-energieverkenning2020-3995.pdf>.
49. Basma, Hussein, Saboori, Arash en Rodriguez, Felipe. Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: battery electric versus diesel. *https://theicct.org/*. [Online] 2021. [Citaat van: 24 08 2022.] <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/11/tco-bets-europe-1-nov21.pdf>.
50. others, Andrew Burnham and. Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. <https://publications.anl.gov/anlpubs/2021/05/167399.pdf>. [Online] April 2021. [Citaat van: 03 06 2022.] <https://publications.anl.gov/anlpubs/2021/05/167399.pdf>.
51. Panteia. Kostencalculaties in het beroepsgoederenvervoer over de weg. <https://panteia.nl>. [Online] juli 2018. [Citaat van: 24 08 2022.]

- https://panteia.nl/index.cfm/_api/render/file/?method=inline&fileID=5B52D01F-D3BA-4170-9179D3CC1C0706B5.
52. PBL. Klimaat- en energieverkenning 2021. *www.pbl.nl*. [Online] 2021. [Citaat van: 08 04 2022.] <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-klimaat-en-energieverkenning-2021-4681.pdf>.
53. *co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/*. *www.co2emissiefactoren.nl*. [Online] [Citaat van: 10 04 2020.] <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/>.
54. <https://www.eex.com>. <https://www.eex.com>. [Online] European Energy Exchange. [Citaat van: 14 04 2020.] <https://www.eex.com/en/products/environmental-markets/emissions-auctions/overview>.
55. Lensink, S en Cleijne, H. <https://publicaties.ecn.nl>. *www.ecn.nl*. [Online] 06 04 2017. [Citaat van: 17 04 2020.] <https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-N--17-015>.
56. International energy agency. *Projected costs of generating electricity*. Paris : IEA, 2020. NEA No. 7531.
57. BloombergNEF. Hydrogen economy outlook. <https://data.bloomberglp.com/>. [Online] 30 03 2020. [Citaat van: 18 03 2022.] <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>.
58. Agency, International Energy. *The future of Hydrogen*. France : IEA Publications, 2019.
59. Peterson, David, Vickers, James en DeSantis, Dan. *Hydrogen Production Cost From PEM Electrolysis*. sl : DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record , 2020.
60. Hydrogen Council. Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. *www.hydrogencouncil.com*. [Online] 20 01 2020. [Citaat van: 08 05 2020.] https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf.
61. *A Step towards the Hydrogen Economy—A Life Cycle Cost Analysis of A Hydrogen Refueling Station*. Viktorsson, Ludvik, et al. 10, sl : MDPI, 2017. DOI 10.3390.
62. PBL. *Klimaat- en energieverkenning 2021*. Den Haag : Planbureau voor de leefomgeving, 2021. PBL-publicatienummer: 4681.
63. Ouden, Bert den en e.a. *Klimaatneutrale energiestenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*. Utrecht : Berenschot Groep B.V., 2020.
64. Effecten ontwerp klimaatakkoord. <https://www.pbl.nl/>. [Online] 28 03 2019. [Citaat van: 28 05 2019.] https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2019-effecten-ontwerp-klimaatakkoord_3619.pdf.
65. <https://economie.rabobank.com/>. <https://economie.rabobank.com/>. [Online] 02 04 2015. [Citaat van: 05 06 2020.] <https://economie.rabobank.com/publicaties/2015/april/de-duikvlucht-van-de-olieprijzen-een-kijkje-achter-de-schermen/>.
66. Hunter, Chad, Michael Penev, Evan Reznicek, Jason Lustbader, Alicia Birky, and Chen Zhang. Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks. <https://www.nrel.gov/>. [Online] 2021. [Citaat van: 03 06 2022.] <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/71796.pdf>.

67. California Air Resources Board. Draft Advanced Clean Trucks Total Cost of Ownership Discussion Document. <https://ww2.arb.ca.gov>. [Online] 22 02 2019. [Citaat van: 07 06 2022.] <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2019/act2019/apph.pdf>.
68. Van Veldhoven-Van der Meer, S. <https://www.rijksoverheid.nl/>. *Kamerbrief over afspraken zero-emissie stadslogistiek*. [Online] 05 10 2020. [Citaat van: 25 05 2022.] <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-infrastructuur-en-waterstaat/documenten/kamerstukken/2020/10/05/afspraken-zero-emissie-stadslogistiek>.
69. Witte, Jan-Jelle, Alonso-González, Maria en Rongen, Tibor. www.kimnet.nl. *Verkenning van het concept mobiliteitshub*. [Online] mei 2021. [Citaat van: 25 05 2022.] <https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2021/05/31/verkenning-van-het-concept-mobiliteitshub>. ISBN 978-90-8902-245-5.
70. Spobeck, H en Spoelstra, M. B. <https://opwegmetwaterstof.nl>. <https://opwegmetwaterstof.nl>. [Online] 19 Juni 2019. [Citaat van: 10 03 2021.] <https://opwegmetwaterstof.nl/wp-content/uploads/2020/03/IFV-Bestuurlijke-handreiking-vergunningverlening-waterstoftankstations.pdf>.
71. Ekinetix B.V. <https://opwegmetwaterstof.nl/>. <https://opwegmetwaterstof.nl/>. [Online] 23 03 2020. [Citaat van: 10 03 2021.] https://opwegmetwaterstof.nl/wp-content/uploads/2020/03/WVIP_uniforme_vergunningverlening_rapport_23_03_2020_F-1.pdf.
72. PGS. <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/>. <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/>. [Online] 04 2020. [Citaat van: 10 03 2021.] <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/PGS35.html>.
73. Neis, S en Honselaar, M. <https://opwegmetwaterstof.nl/>. <https://opwegmetwaterstof.nl/>. [Online] 30 06 2019. [Citaat van: 10 03 2021.] <https://opwegmetwaterstof.nl/wp-content/uploads/2020/04/Uitwerking-opdracht-RWS-Vergunningen-H2tankstation.pdf>.
74. FCH2JU. <https://www.fch.europa.eu>. <https://www.fch.europa.eu>. [Online] 20 09 2019. [Citaat van: 12 03 2021.] <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Assessment%20and%20lessons%20learnt%20from%20HIAD%202.0.pdf>.
75. Pagliaro, P. <https://www.researchgate.net>. <https://www.researchgate.net>. [Online] september 2019. [Citaat van: 17 03 2021.] https://www.researchgate.net/publication/335586786_Hydrogen_Refueling_Stations_Safety_and_Sustainability/link/5d6e818f299bf16522f2c84c/download.
76. Flohr, R. en Rosmuller, N. www.ifv.nl/kennisplein. www.ifv.nl. [Online] 12 06 2018. [Citaat van: 22 03 2021.] <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20180612-IFV-Waterstof-als-brandstof-voor-voertuigen-aandachtspunten-voor-incidentbestrijding.pdf>.
77. Bestuurlijk Omgevingsberaad. <https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/>. <https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/>. [Online] 04 2020. [Citaat van: 22 03 2021.] https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS26/PGS_26_v0.2_april_2020.pdf.
78. Zero-e. <https://www.zero-e.nl/>. <https://www.zero-e.nl/>. [Online] Zero-e. [Citaat van: 26 03 2021.] <https://www.zero-e.nl/blog/in-vijf-stappen-naar-een-veilige-cng-werkplaats/>.

79. Berger, Roland. Study on fuel cells hydrogen trucks. <https://www.fch.europa.eu/>. [Online] 15 12 2020. [Citaat van: 25 05 2022.] <https://www.fch.europa.eu/publications/study-fuel-cells-hydrogen-trucks>.
80. Dril, T. van. <http://publications.tno.nl/>. *Verkenning werkgelegenheidseffecten van*. [Online] 15 03 2019. [Citaat van: 26 03 2021.] <http://publications.tno.nl/publication/34627734/KBGZLx/TNO-2019-P10369.pdf>.
81. Stultiens, Els. <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/>. <https://solarmagazine.nl/>. [Online] Solar Magazine, 13 02 2020. [Citaat van: 31 03 2021.] <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i20574/jinkosolar-opnieuw-s-werelds-grootste-fabrikant-van-zonnepanelen>.
82. Lensink, S en Schoots, K. <https://www.pbl.nl>. <https://www.pbl.nl>. [Online] 30 03 2021. [Citaat van: 13 04 2021.] https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-eindadvies-basisbedragen-sde-plus-plus-2021_4032.pdf.
83. Velthuijsen, J. W. <https://www.rijksoverheid.nl/>. <https://www.rijksoverheid.nl/>. [Online] 07 06 2018. [Citaat van: 13 04 2021.] <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2018/08/31/de-economische-bijdrage-van-windenergie-op-zee/20180606+Economische+bijdrage+van+windenergie+op+zee.pdf>.
84. RVO. <https://www.rvo.nl/>. *Windenergie op zee*. [Online] 04 2016. [Citaat van: 14 04 2021.] https://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/04/A4-Posters%20Rijk_WoZ_februari%202016.pdf.
85. Janssen, D. <https://www.euractiv.com>. <https://www.euractiv.com>. [Online] Euractiv, 28 08 2020. [Citaat van: 31 03 2021.] <https://www.euractiv.com/section/energy/news/europe-china-battle-for-global-supremacy-on-electrolyser-manufacturing/>.
86. Leguit, C, et al. <https://ce.nl/>. <https://ce.nl/>. [Online] 12 2018. [Citaat van: 09 04 2021.] https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_180015_Werk_door_groene_waterstof_DEF.pdf.
87. opwegmetwaterstof.nl. <https://opwegmetwaterstof.nl>. <https://opwegmetwaterstof.nl>. [Online] H2Platform, 19 02 2021. [Citaat van: 07 04 2021.] <https://opwegmetwaterstof.nl/boost-voor-productie-waterstoftrucks-in-nederland/>.
88. rtvnoord. <https://www.rtvnoord.nl/>. <https://www.rtvnoord.nl/>. [Online] rtvnoord, 17 11 2020. [Citaat van: 07 04 2021.] <https://www.rtvnoord.nl/nieuws/762487/Holthausen-wil-waterstoftrucks-bouwen-in-Winschoten-zorgt-voor-1000-banen-update>.
89. ACEA. <https://www.acea.be/>. <https://www.acea.be/>. [Online] European automobile manufacturers association. [Citaat van: 07 04 2021.] <https://www.acea.be/statistics/tag/category/commercial-vehicles>.
90. Vreemann, Gert. <https://edepot.wur.nl>. <https://edepot.wur.nl>. [Online] 11 2010. [Citaat van: 31 03 2021.] <https://edepot.wur.nl/158975>.
91. *International journal of hydrogen energy*. Cantuarias-Villessuzanne, C., et al. 42, sl : Elsevier, 2016, Vol. 41. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.213>.
92. Taibi, E., et al. Green hydrogen cost reduction, scaling up electrolyzers to meet the 1,5 degrees climate goal. <https://irena.org/>. [Online] 2020. [Citaat van: 21 04 2021.] https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.

93. Wieclawska, Sara en Gavrilova, Anastasia. Op weg naar een groene toekomst. <https://repository.tno.nl/>. [Online] 2021. [Citaat van: 08 09 2022.] <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A65b0deeb-42b6-4f78-8388-3ac5db426be1>. TNO 21-12054.
94. Bosch goes for platinum-light fuel cells. <https://www.reuters.com/>. [Online] Reuters, 13 05 2019. [Citaat van: 21 04 2021.] <https://www.reuters.com/article/us-platinum-week-bosch-fuelcells-exclusi/exclusive-bosch-goes-for-platinum-light-fuel-cells-idUSKCN1SJ0FG>.
95. Elzenga, Hans, Pisca, Iulia en Lensink, Sander. www.pbl.nl. *Conceptadvies SDE++ 2022 Waterstofproductie via elektrolyse*. [Online] 22 04 2021. [Citaat van: 24 05 2022.] <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-conceptadvies-sde-plus-plus-2022-waterstofproductie-via-elektrolyse-4392.pdf>.
96. Tezel, Gülbahar. HyWay 27: waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk? <https://www.hyway27.nl/>. [Online] juni 2021. [Citaat van: 25 05 2022.] <https://www.hyway27.nl/actueel/hyway-27-realisatie-van-het-landelijk-waterstofnetwerk>.
97. Engel van den, Aad, et al. Maak ruim baan voor elektrisch goederenvervoer. www.elaad.nl. [Online] Januari 2022. [Citaat van: 01 06 2022.] <https://www.elaad.nl/uploads/files/Eindrapport-Qirion-Panteia-Maak-ruim-baan-voor-elektrisch-goederenvervoer.pdf>.
98. Nicholas, Michael. Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas. <https://theicct.org/>. [Online] August 2019. [Citaat van: 03 06 2022.] https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_Charging_Cost_20190813.pdf.
99. Nelder, Chris en Rogers, Emily. Reducing EV Charging Infrastructure Costs. <https://rmi.org/>. [Online] December 2019. [Citaat van: 03 06 2022.] <https://rmi.org/insight/reducing-ev-charging-infrastructure-costs>.
100. California Air Resources Board. Battery Electric Truck and Bus Energy Efficiency Compared to Conventional Diesel Vehicles. <https://ww2.arb.ca.gov>. [Online] Mei 2018. [Citaat van: 08 06 2022.] <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2018-11/180124hdbvefficiency.pdf>.
101. *Real-world study for the optimal charging of electric vehicles*. Kostopoulos, E., Spyropoulos, G. en Kaldellis, J. November 2020, sl : Elsevier, 2020, Vol. Energy reports, volume 6. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.008>.
102. Lawrence Berkeley National Laboratory. Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now. <https://eta-publications.lbl.gov>. [Online] March 2021. [Citaat van: 07 06 2022.] https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/updated_5_final_ehdv_report_033121.pdf.
103. *Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe*. Noll, B., et al. 118079, sl : Applied Energy, Elsevier, 2022, Vol. 306. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118079>.
104. Unterlohner, Fedor. How to decarbonize long-haul trucking in Germany. <https://www.transportenvironment.org>. [Online] April 2021. [Citaat van: 06 07 2022.] https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2021_04_TE_how_to_decarbonise_long_haul_trucking_in_Germany_final.pdf.

105. Cole, Wesley, Frazier, A. Will en Augustine, Chad. Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update. <https://www.nrel.gov>. [Online] June 2021. [Citaat van: 10 06 2022.] <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79236.pdf>.
106. U.S. Department of Energy. Energy Storage Grand Challenge: Energy Storage Market Report. <https://www.energy.gov>. [Online] December 2020. [Citaat van: 10 06 2022.] https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Market%20Report%202020_0.pdf.
107. Gigler, jorg en Weeda, Marcel. Contouren van een routekaart waterstof. www.topsectorenergie.nl. [Online] 20 mei 2019. <https://www.topsectorenergie.nl/tki-nieuw-gas/documenten>.
108. Interprovinciaal overleg. Bestuursakkoord Zero emissie regionaal openbaar vervoer per bus . <https://ipo.nl/>. [Online] 15 05 2016. [Citaat van: 21 05 2019.] https://ipo.nl/files/7914/9422/8241/Bestuursakkoord_Zero_OV-Bus_v3.pdf.
109. Elektrisch Rijden – Personenauto's en laadpunten. <https://www.rvo.nl>. [Online] januari 2019. [Citaat van: 22 05 2019.] <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/02/Elektrisch%20Rijden%20%20Personenautos%20en%20laadpunten%20%20Analyse%20over%202018.pdf>.
110. *Nationale energieverkenning 2017*. Amsterdam/Petten : ECN, 2017.
111. <https://www.acea.be>. <https://www.acea.be>. [Online] European automobile manufacturers association, 15 12 2020. [Citaat van: 07 04 2021.] <https://www.acea.be/press-releases/article/all-new-trucks-sold-must-be-fossil-free-by-2040-agree-truck-makers-and-clim>.

Bijlage 1 Dieselprijs 2012-2021³⁶

Gemiddelde prijsopbouw diesel (centen/liter)	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Productieprijs af-raffinaderij (Argus)	63,50	58,10	57,04	45,23	30,44	40,41
Margetraject (marge oliemij, marge pomphouders, distributie- en marketingkosten, kortingen)	17,28	19,02	17,85	18,33	17,67	19,37
Prijs voor accijnzen, heffingen en BTW	80,78	77,12	74,90	63,56	48,11	59,78
Accijnzen + heffingen	43,67	44,62	48,58	49,01	49,25	49,39
Pompprijs excl BTW	124,45	121,74	123,47	112,56	97,36	109,17
BTW 21 %	23,65	25,56	25,93	23,64	20,44	22,93
Pompadviesprijs incl BTW in eurocenten/liter	148,10	147,30	149,40	136,20	117,80	132,10
Accijns, heffingen en BTW in eurocenten/liter	67,32	70,18	74,50	72,64	69,69	72,42
Overheidsaandeel in % van de pompprijs	45,50	47,60	49,90	53,30	59,20	54,70

Gemiddelde prijsopbouw diesel (centen/liter)	2018	2019	2020	2021	Gemiddeld
Productieprijs af-raffinaderij (Argus)	50,37	49,86	29,74	59,21	48,39
Margetraject (marge oliemij, marge pomphouders, distributie- en marketingkosten, kortingen)	19,93	22,66	26,70	26,70	20,55
Prijs voor accijnzen, heffingen en BTW	70,30	72,52	56,44	85,91	68,94
Accijnzen + heffingen	49,78	50,37	50,36	52,97	48,80
Pompprijs excl BTW	120,08	122,89	106,80	138,88	117,74
BTW 21 %	25,22	25,81	22,43	29,16	24,48
Pompadviesprijs incl BTW in eurocenten/liter	145,30	148,70	129,23	168,04	142,22
Accijns, heffingen en BTW in eurocenten/liter	75,00	76,20	72,79	82,13	73,29
Overheidsaandeel in % van de pompprijs	51,60	51,20	56,30	48,90	51,82

³⁶ <https://bovagrai.info/auto/2021/fiscale-betekenis/6-5-opbouw-brandstofprijzen/>

Voor deze tabel is gebruik gemaakt van de jaargangen 2012 - 2021

Bijlage 2 Prijsverwachting diesel in eurocent 2020-2035

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Olieprijs (€ per vat)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Productieprijs af-raffinaderij (€ cent per liter)	€ 47,32	€ 52,50	€ 57,68	€ 62,86	€ 68,04	€ 73,21	€ 78,39	€ 83,57
Margetraject (marge oliemij, marge pomphouders, distributie- en marketingkosten, kortingen)	28,77	31,92	35,07	38,22	41,36	44,51	47,66	50,81
Prijs voor accijnzen, heffingen en BTW	12,22	13,56	14,89	16,23	17,57	18,90	20,24	21,58
Accijnzen + heffingen	40,99	45,48	49,96	54,45	58,93	63,42	67,90	72,39
Pompprijs excl BTW	29,01	32,19	35,36	38,54	41,71	44,89	48,06	51,24
BTW 21 %	70,00	77,66	85,32	92,98	100,64	108,31	115,97	123,63
Pompadviesprijs incl BTW in eurocenten/liter	14,55	16,15	17,74	19,33	20,92	22,52	24,11	25,70
Accijns, heffingen en BTW in eurocenten/liter	84,56	93,81	103,06	112,31	121,57	130,82	140,07	149,33

	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Olieprijs (€ per vat)	€ 88,75	€ 93,93	€ 99,11	€ 100,36	€ 101,61	€ 102,86	€ 104,11	€ 105,36
Productieprijs af-raffinaderij (€ cent per liter)	53,96	57,11	60,25	61,01	61,77	62,53	63,29	64,05
Margetraject (marge oliemij, marge pomphouders, distributie- en marketingkosten, kortingen)	22,92	24,25	25,59	25,91	26,24	26,56	26,88	27,20
Prijs voor accijnzen, heffingen en BTW	76,87	81,36	85,85	86,93	88,01	89,09	90,18	91,26
Accijnzen + heffingen	54,42	57,59	60,77	61,53	62,30	63,06	63,83	64,60
Pompprijs excl BTW	131,29	138,95	146,61	148,46	150,31	152,16	154,01	155,85
BTW 21 %	27,29	28,89	30,48	30,86	31,25	31,63	32,02	32,40
Pompadviesprijs incl BTW in eurocenten/liter	158,58	167,83	177,09	179,32	181,55	183,79	186,02	188,25
Accijns, heffingen en BTW in eurocenten/liter	81,72	86,49	91,26	92,41	93,56	94,71	95,86	97,01

Bijlage 3 Kasstroomoverzicht bij gebruik van uitsluitend PV en een kleine vloot.

	31-12-2020	31-12-2021	31-12-2022	31-12-2023	31-12-2024	31-12-2025	31-12-2026	31-12-2027	31-12-2028	31-12-2029	31-12-2030	31-12-2031	31-12-2032	31-12-2033	31-12-2034	Restwaarde	NCW	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
CAPEX																		
PV	€ 565.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 226.000	€ 470.698
Electrolyser	€ 1.500.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 375.000	€ 1.343.526
Vervanging stack		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ -	€ -
Compressor	€ 157.239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 157.239	€ 157.239	€ 157.239
Tube trailer	€ 150.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 150.000	0	0	0	0	€ 112.500	€ 177.603
Opslag	€ 987.900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 246.975	€ 884.846
Tankstation	€ 1.174.302	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 1.174.302	0	0	0	0	0	0	€ 587.151	€ 1.585.029
Vrachtwagens	€ 1.750.100	0	0	0	0	0	0	€ 1.750.100	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 218.763	€ 2.756.852
Bestelbussen	€ 1.136.000	0	0	0	0	0	0	€ 1.136.000	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 142.000	€ 1.789.489
																	€ 9.165.282	
OPEX																		
Elektriciteit voor productie H2	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Transportkosten netwerk	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Kosten GVO	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Compressie	€ 3.342	€ 3.463	€ 3.584	€ 3.705	€ 3.826	€ 3.946	€ 4.067	€ 4.188	€ 4.309	€ 4.430	€ 4.539	€ 4.648	€ 4.757	€ 4.865	€ 4.974		€ 39.335	
transport	€ 7.060	€ 7.201	€ 7.345	€ 7.492	€ 7.642	€ 7.795	€ 7.951	€ 8.110	€ 8.272	€ 8.438	€ 8.606	€ 8.778	€ 8.954	€ 9.133	€ 9.316		€ 77.382	
Chauffeur	€ 9.653	€ 9.846	€ 10.042	€ 10.243	€ 10.448	€ 10.657	€ 10.870	€ 11.088	€ 11.309	€ 11.536	€ 11.766	€ 12.002	€ 12.242	€ 12.487	€ 12.736		€ 105.796	
Elektriciteit tankstation	€ 1.672	€ 1.732	€ 1.793	€ 1.853	€ 1.914	€ 1.974	€ 2.035	€ 2.095	€ 2.156	€ 2.216	€ 2.271	€ 2.325	€ 2.379	€ 2.434	€ 2.488		€ 19.676	
Onderhoud:																		
PV	€ 5.650	€ 5.763	€ 5.878	€ 5.996	€ 6.116	€ 6.238	€ 6.363	€ 6.490	€ 6.620	€ 6.752	€ 6.887	€ 7.025	€ 7.166	€ 7.309	€ 7.455		€ 61.926	
Electrolyser	€ 60.000	€ 61.200	€ 62.424	€ 63.672	€ 64.946	€ 66.245	€ 67.570	€ 68.921	€ 70.300	€ 71.706	€ 73.140	€ 74.602	€ 76.095	€ 77.616	€ 79.169		€ 657.624	
Compressor	€ 6.290	€ 6.415	€ 6.544	€ 6.675	€ 6.808	€ 6.944	€ 7.083	€ 7.225	€ 7.369	€ 7.517	€ 7.667	€ 7.820	€ 7.977	€ 8.136	€ 8.299		€ 68.936	
Tube trailer	€ 3.000	€ 3.060	€ 3.121	€ 3.184	€ 3.247	€ 3.312	€ 3.378	€ 3.446	€ 3.515	€ 3.585	€ 3.657	€ 3.730	€ 3.805	€ 3.881	€ 3.958		€ 32.881	
Tankstation	€ 89.000	€ 90.780	€ 92.596	€ 94.448	€ 96.336	€ 98.263	€ 100.228	€ 102.233	€ 104.278	€ 106.363	€ 108.491	€ 110.660	€ 112.874	€ 115.131	€ 117.434		€ 975.476	
Vrachtwagens	€ 36.075	€ 36.797	€ 37.532	€ 38.283	€ 39.049	€ 39.830	€ 40.626	€ 41.439	€ 42.268	€ 43.113	€ 43.975	€ 44.855	€ 45.752	€ 46.667	€ 47.600		€ 395.397	
Bestelbus	€ 14.232	€ 14.517	€ 14.807	€ 15.104	€ 15.406	€ 15.714	€ 16.028	€ 16.349	€ 16.676	€ 17.009	€ 17.349	€ 17.696	€ 18.050	€ 18.411	€ 18.779		€ 155.993	
Totaal uitgaven	€ 235.973	€ 240.774	€ 245.667	€ 250.654	€ 255.737	€ 260.919	€ 266.200	€ 271.583	€ 277.071	€ 282.664	€ 288.348	€ 294.142	€ 300.049	€ 306.070	€ 312.209		€ 2.590.422	
Opbrengsten																		
Vermeden brandstofkosten	€ 24.912	€ 27.638	€ 30.364	€ 33.090	€ 35.816	€ 38.542	€ 41.269	€ 43.995	€ 46.721	€ 49.447	€ 52.173	€ 54.900	€ 57.626	€ 60.352	€ 63.078		€ 389.687	
Vermeden CO2-uitstoot	€ 4.751	€ 5.315	€ 5.878	€ 6.441	€ 7.004	€ 7.567	€ 8.130	€ 8.693	€ 9.256	€ 9.820	€ 10.383	€ 10.946	€ 11.509	€ 12.072	€ 12.635		€ 78.558	
Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 420.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 52.500	€ 661.607	
Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 240.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 30.000	€ 378.061	
Opbrengst waterstof	€ 40.268	€ 41.073	€ 41.894	€ 42.732	€ 43.587	€ 44.459	€ 45.348	€ 46.255	€ 47.180	€ 48.123	€ 49.086	€ 50.068	€ 51.069	€ 52.090	€ 53.132		€ 441.349	
Vermeden onderhoud vrachtwagens	€ 36.075	€ 36.797	€ 37.532	€ 38.283	€ 39.049	€ 39.830	€ 40.626	€ 41.439	€ 42.268	€ 43.113	€ 43.975	€ 44.855	€ 45.752	€ 46.667	€ 47.600		€ 395.397	
Vermeden onderhoud bestelbussen	€ 14.232	€ 14.517	€ 14.807	€ 15.104	€ 15.406	€ 15.714	€ 16.028	€ 16.349	€ 16.676	€ 17.009	€ 17.349	€ 17.696	€ 18.050	€ 18.411	€ 18.779		€ 155.993	
Totaal ontvangsten	€ 120.238	€ 125.339	€ 130.476	€ 135.650	€ 140.861	€ 146.112	€ 151.401	€ 156.730	€ 162.100	€ 167.512	€ 172.966	€ 178.466	€ 184.012	€ 189.604	€ 195.243		€ 2.500.651	
NCW	€ 9.255.053																	

Bijlage 4 Kastroomoverzicht bij gebruik PV en elektriciteitsnet voor beperkte vloot.

		31-12-2020	31-12-2021	31-12-2022	31-12-2023	31-12-2024	31-12-2025	31-12-2026	31-12-2027	31-12-2028	31-12-2029	31-12-2030	31-12-2031	31-12-2032	31-12-2033	31-12-2034	Restwaarde	NCW	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
CAPEX																			
PV	€ 565.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 226.000	€ 470.698
Electrolyser	€ 1.500.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 375.000	€ 1.343.526
Vervanging stack		0	0	0	0	€ 525.000	0	0	0	0	€ 525.000	0	0	0	0	€ 525.000	€ 525.000,00	€ 685.468	
Compressor	€ 157.239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 157.239	€ 157.239	€ 157.239
Tube trailer	€ 150.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 150.000	0	0	0	€ 112.500	€ 177.603	
Opslag	€ -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ -	€ -	
Tankstation	€ 1.174.302	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 1.174.302	0	0	0	0	0	0	0	€ 587.151	€ 1.585.029
Vrachtwagens	€ 1.750.100	0	0	0	0	0	0	0	€ 1.750.100	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 218.763	€ 2.756.852
Bestelbussen	€ 1.136.000	0	0	0	0	0	0	0	€ 1.136.000	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 142.000	€ 1.789.489
																		€ 8.965.903	
OPEX																			
Elektriciteit voor productie H2	€ 312.015	€ 323.302	€ 334.589	€ 345.877	€ 357.164	€ 368.451	€ 379.739	€ 391.026	€ 402.314	€ 413.601	€ 423.759	€ 433.918	€ 444.077	€ 454.235	€ 464.394			€ 3.672.347	
Transportkosten netwerk	€ 44.988	€ 45.888	€ 46.806	€ 47.742	€ 48.697	€ 49.671	€ 50.664	€ 51.677	€ 52.711	€ 53.765	€ 54.840	€ 55.937	€ 57.056	€ 58.197	€ 59.361			€ 493.088	
Kosten GVO	€ 14.512	€ 14.803	€ 15.099	€ 15.401	€ 15.709	€ 16.023	€ 16.343	€ 16.670	€ 17.003	€ 17.344	€ 17.690	€ 18.044	€ 18.405	€ 18.773	€ 19.149			€ 159.061	
Compressie	€ 22.601	€ 23.418	€ 24.236	€ 25.054	€ 25.871	€ 26.689	€ 27.506	€ 28.324	€ 29.142	€ 29.959	€ 30.695	€ 31.431	€ 32.167	€ 32.903	€ 33.638			€ 266.007	
transport	€ 7.060	€ 7.201	€ 7.345	€ 7.492	€ 7.642	€ 7.795	€ 7.951	€ 8.110	€ 8.272	€ 8.438	€ 8.606	€ 8.778	€ 8.954	€ 9.133	€ 9.316			€ 77.382	
Chauffeur	€ 9.653	€ 9.846	€ 10.042	€ 10.243	€ 10.448	€ 10.657	€ 10.870	€ 11.088	€ 11.309	€ 11.536	€ 11.766	€ 12.002	€ 12.242	€ 12.487	€ 12.736			€ 105.796	
Elektriciteit tankstation	€ 1.672	€ 1.732	€ 1.793	€ 1.853	€ 1.914	€ 1.974	€ 2.035	€ 2.095	€ 2.156	€ 2.216	€ 2.271	€ 2.325	€ 2.379	€ 2.434	€ 2.488			€ 19.676	
Onderhoud:																			
PV	€ 5.650	€ 5.763	€ 5.878	€ 5.996	€ 6.116	€ 6.238	€ 6.363	€ 6.490	€ 6.620	€ 6.752	€ 6.887	€ 7.025	€ 7.166	€ 7.309	€ 7.455			€ 61.926	
Electrolyser	€ 60.000	€ 61.200	€ 62.424	€ 63.672	€ 64.946	€ 66.245	€ 67.570	€ 68.921	€ 70.300	€ 71.706	€ 73.140	€ 74.602	€ 76.095	€ 77.616	€ 79.169			€ 657.624	
Compressor	€ 6.290	€ 6.415	€ 6.544	€ 6.675	€ 6.808	€ 6.944	€ 7.083	€ 7.225	€ 7.369	€ 7.517	€ 7.667	€ 7.820	€ 7.977	€ 8.136	€ 8.299			€ 68.936	
Tube trailer	€ 3.000	€ 3.060	€ 3.121	€ 3.184	€ 3.247	€ 3.312	€ 3.378	€ 3.446	€ 3.515	€ 3.585	€ 3.657	€ 3.730	€ 3.805	€ 3.881	€ 3.958			€ 32.881	
Tankstation	€ 89.000	€ 90.780	€ 92.596	€ 94.448	€ 96.336	€ 98.263	€ 100.228	€ 102.233	€ 104.278	€ 106.363	€ 108.491	€ 110.660	€ 112.874	€ 115.131	€ 117.434			€ 975.476	
Vrachtwagens	€ 36.075	€ 36.797	€ 37.532	€ 38.283	€ 39.049	€ 39.830	€ 40.626	€ 41.439	€ 42.268	€ 43.113	€ 43.975	€ 44.855	€ 45.752	€ 46.667	€ 47.600			€ 395.397	
Bestelbus	€ 14.232	€ 14.517	€ 14.807	€ 15.104	€ 15.406	€ 15.714	€ 16.028	€ 16.349	€ 16.676	€ 17.009	€ 17.349	€ 17.696	€ 18.050	€ 18.411	€ 18.779			€ 155.993	
Totaal uitgaven	€ 626.747	€ 644.722	€ 662.813	€ 681.022	€ 699.352	€ 717.806	€ 736.385	€ 755.093	€ 773.931	€ 792.903	€ 810.794	€ 828.825	€ 846.996	€ 865.313	€ 883.777			€ 7.141.590	
																		€ -	
																		€ -	
Opbrengsten																			
Vermeden brandstofkosten	€ 24.912	€ 27.638	€ 30.364	€ 33.090	€ 35.816	€ 38.542	€ 41.269	€ 43.995	€ 46.721	€ 49.447	€ 52.173	€ 54.831	€ 57.489	€ 60.147	€ 62.805			€ 389.687	
Vermeden CO2-uitstoot	€ 4.751	€ 5.315	€ 5.878	€ 6.441	€ 7.004	€ 7.567	€ 8.130	€ 8.693	€ 9.256	€ 9.820	€ 10.383	€ 10.946	€ 11.509	€ 12.072	€ 12.635			€ 78.558	
Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 420.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 420.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 52.500	€ -	€ 661.607	
Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 240.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 240.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 30.000	€ -	€ 378.061	
Opbrengst waterstof	€ 752.565	€ 767.617	€ 782.969	€ 798.628	€ 814.601	€ 830.893	€ 847.511	€ 864.461	€ 881.750	€ 899.385	€ 917.373	€ 935.720	€ 954.435	€ 973.523	€ 992.994			€ 8.248.420	
Vermeden onderhoud vrachtwagens	€ 36.075	€ 36.797	€ 37.532	€ 38.283	€ 39.049	€ 39.830	€ 40.626	€ 41.439	€ 42.268	€ 43.113	€ 43.975	€ 44.855	€ 45.752	€ 46.667	€ 47.600			€ 395.397	
Vermeden onderhoud bestelbussen	€ 14.232	€ 14.517	€ 14.807	€ 15.104	€ 15.406	€ 15.714	€ 16.028	€ 16.349	€ 16.676	€ 17.009	€ 17.349	€ 17.696	€ 18.050	€ 18.411	€ 18.779			€ 155.993	
Totaal ontvangsten	€ 832.536	€ 851.882	€ 871.550	€ 891.546	€ 911.875	€ 932.546	€ 953.564	€ 974.936	€ 996.671	€ 1.018.774	€ 1.041.253	€ 1.064.048	€ 1.087.235	€ 1.110.821	€ 1.135.314			€ 10.307.722	
																		€ 5.799.772	
NCW	€ 5.799.772																		

Bijlage 5 Kastroomoverzicht bij gebruik PV en elektriciteitsnet voor uitgebreide vloot.

		31-12-2020	31-12-2021	31-12-2022	31-12-2023	31-12-2024	31-12-2025	31-12-2026	31-12-2027	31-12-2028	31-12-2029	31-12-2030	31-12-2031	31-12-2032	31-12-2033	31-12-2034	Restwaarde	NCW	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
CAPEX																			
PV	€ 565.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 226.000	€ 470.698
Electrolyser	€ 1.500.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 375.000	€ 1.343.526
Vervanging stack		0	0	0	0	€ 525.000	0	0	0	0	€ 525.000	0	0	0	0	0	€ 525.000	€ 525.000,00	€ 685.468
Compressor	€ 157.239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 157.239	€ 157.239
Tube trailer	€ 150.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 150.000	0	0	0	0	€ 112.500	€ 177.603
Opslag	€ -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ -	€ -
Tankstation	€ 1.174.302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 1.174.302	0	0	0	0	0	0	€ 587.151	€ 1.585.029
Vrachtwagens	€ 16.625.950	0	0	0	0	0	0	0	€ 16.625.950	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 2.078.244	€ 26.190.098
Bestelbussen	€ 1.278.000	0	0	0	0	0	0	0	€ 1.278.000	0	0	0	0	0	0	0	0	€ 159.750	€ 2.013.175
																		€	32.622.835
OPEX																			
Elektriciteit voor productie H2	€ 312.015	€ 323.302	€ 334.589	€ 345.877	€ 357.164	€ 368.451	€ 379.739	€ 391.026	€ 402.314	€ 413.601	€ 423.759	€ 433.918	€ 444.077	€ 454.235	€ 464.394				€ 3.672.347
Transportkosten netwerk	€ 44.988	€ 45.888	€ 46.806	€ 47.742	€ 48.697	€ 49.671	€ 50.664	€ 51.677	€ 52.711	€ 53.765	€ 54.840	€ 55.937	€ 57.056	€ 58.197	€ 59.361				€ 493.088
Kosten GVO	€ 14.512	€ 14.803	€ 15.099	€ 15.401	€ 15.709	€ 16.023	€ 16.343	€ 16.670	€ 17.003	€ 17.344	€ 17.690	€ 18.044	€ 18.405	€ 18.773	€ 19.149				€ 159.061
Compressie	€ 22.601	€ 23.418	€ 24.236	€ 25.054	€ 25.871	€ 26.689	€ 27.506	€ 28.324	€ 29.142	€ 29.959	€ 30.695	€ 31.431	€ 32.167	€ 32.903	€ 33.638				€ 266.007
transport	€ 52.525	€ 53.576	€ 54.647	€ 55.740	€ 56.855	€ 57.992	€ 59.152	€ 60.335	€ 61.541	€ 62.772	€ 64.028	€ 65.308	€ 66.614	€ 67.947	€ 69.306				€ 575.696
Chauffeur	€ 71.812	€ 73.248	€ 74.713	€ 76.207	€ 77.731	€ 79.286	€ 80.872	€ 82.489	€ 84.139	€ 85.822	€ 87.538	€ 89.289	€ 91.074	€ 92.896	€ 94.754				€ 787.084
Elektriciteit tankstation	€ 12.596	€ 13.052	€ 13.507	€ 13.963	€ 14.419	€ 14.874	€ 15.330	€ 15.786	€ 16.241	€ 16.697	€ 17.107	€ 17.517	€ 17.927	€ 18.337	€ 18.747				€ 148.251
Onderhoud:																			
PV	€ 5.650	€ 5.763	€ 5.878	€ 5.996	€ 6.116	€ 6.238	€ 6.363	€ 6.490	€ 6.620	€ 6.752	€ 6.887	€ 7.025	€ 7.166	€ 7.309	€ 7.455				€ 61.926
Electrolyser	€ 60.000	€ 61.200	€ 62.424	€ 63.672	€ 64.946	€ 66.245	€ 67.570	€ 68.921	€ 70.300	€ 71.706	€ 73.140	€ 74.602	€ 76.095	€ 77.616	€ 79.169				€ 657.624
Compressor	€ 6.290	€ 6.415	€ 6.544	€ 6.675	€ 6.808	€ 6.944	€ 7.083	€ 7.225	€ 7.369	€ 7.517	€ 7.667	€ 7.820	€ 7.977	€ 8.136	€ 8.299				€ 68.936
Tube trailer	€ 3.000	€ 3.060	€ 3.121	€ 3.184	€ 3.247	€ 3.312	€ 3.378	€ 3.446	€ 3.515	€ 3.585	€ 3.657	€ 3.730	€ 3.805	€ 3.881	€ 3.958				€ 32.881
Tankstation	€ 89.000	€ 90.780	€ 92.596	€ 94.448	€ 96.336	€ 98.263	€ 100.228	€ 102.233	€ 104.278	€ 106.363	€ 108.491	€ 110.660	€ 112.874	€ 115.131	€ 117.434				€ 975.476
Vrachtwagens	€ 342.713	€ 349.567	€ 356.558	€ 363.689	€ 370.963	€ 378.382	€ 385.950	€ 393.669	€ 401.542	€ 409.573	€ 417.765	€ 426.120	€ 434.642	€ 443.335	€ 452.202				€ 3.756.268
Bestelbus	€ 16.011	€ 16.332	€ 16.658	€ 16.991	€ 17.331	€ 17.678	€ 18.031	€ 18.392	€ 18.760	€ 19.135	€ 19.518	€ 19.908	€ 20.306	€ 20.713	€ 21.127				€ 175.492
Totaal uitgaven	€ 1.053.712	€ 1.080.403	€ 1.107.376	€ 1.134.637	€ 1.162.193	€ 1.190.048	€ 1.218.210	€ 1.246.683	€ 1.275.474	€ 1.304.591	€ 1.332.782	€ 1.361.311	€ 1.390.184	€ 1.419.409	€ 1.448.992				€ 11.830.137
																			€ -
																			€ -
Opbrengsten																			
Vermeden brandstofkosten	€ 196.021	€ 217.473	€ 238.924	€ 260.376	€ 281.827	€ 303.278	€ 324.730	€ 346.181	€ 367.633	€ 389.084	€ 410.535	€ 415.713	€ 420.891	€ 426.069	€ 431.247				€ 3.066.334
Vermeden CO2-uitstoot	€ 37.388	€ 41.819	€ 46.250	€ 50.681	€ 55.112	€ 59.543	€ 63.974	€ 68.405	€ 72.836	€ 77.268	€ 81.699	€ 86.130	€ 90.561	€ 94.992	€ 99.423				€ 618.148
Vermeden vrachtwagens (diesel)	€ 3.990.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 3.990.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 498.750	€ 6.285.264
Vermeden bestelbussen (diesel)	€ 270.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 270.000	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 33.750	€ 425.319
Opbrengst waterstof	€ -1.480	€ -1.509	€ -1.540	€ -1.570	€ -1.602	€ -1.634	€ -1.667	€ -1.700	€ -1.734	€ -1.769	€ -1.804	€ -1.840	€ -1.877	€ -1.914	€ -1.953				€ -16.220
Vermeden onderhoud vrachtwagens	€ 342.713	€ 349.567	€ 356.558	€ 363.689	€ 370.963	€ 378.382	€ 385.950	€ 393.669	€ 401.542	€ 409.573	€ 417.765	€ 426.120	€ 434.642	€ 443.335	€ 452.202				€ 3.756.268
Vermeden onderhoud bestelbussen	€ 16.011	€ 16.332	€ 16.658	€ 16.991	€ 17.331	€ 17.678	€ 18.031	€ 18.392	€ 18.760	€ 19.135	€ 19.518	€ 19.908	€ 20.306	€ 20.713	€ 21.127				€ 175.492
Totaal ontvangsten	€ 590.653	€ 623.681	€ 656.851	€ 690.167	€ 723.632	€ 757.248	€ 791.019	€ 824.948	€ 859.038	€ 893.291	€ 927.713	€ 962.311	€ 997.074	€ 1.032.089	€ 1.067.366				€ 14.310.605
																			€ 30.142.368
NCW	€ 30.142.368																		

Bijlage 6 De LCOD van een dieselvrachtwagen gebaseerd op Kostencomputaties in het beroepsgoederenvervoer over de weg (51).

Inflatie	2	1,02																
Discontovoet	6	0,06																
Jaar		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	NPV	
Kosten																		
Investering	€ 230.820																	
Banden		€ 3.024	€ 3.084	€ 3.146	€ 3.209	€ 3.273	€ 3.339	€ 3.406	€ 3.474	€ 3.543	€ 3.614	€ 3.686	€ 3.760	€ 3.835	€ 3.912	€ 3.990	€ 33.144	
Brandstof		€ 27.994	€ 28.554	€ 29.125	€ 29.707	€ 30.302	€ 30.908	€ 31.526	€ 32.156	€ 32.799	€ 33.455	€ 34.125	€ 34.807	€ 35.503	€ 36.213	€ 36.937	€ 306.826	
Reparatie en onderhoud		€ 6.086	€ 6.208	€ 6.332	€ 6.459	€ 6.588	€ 6.719	€ 6.854	€ 6.991	€ 7.131	€ 7.273	€ 7.419	€ 7.567	€ 7.719	€ 7.873	€ 8.030	€ 66.705	
Totaal		€ 37.104	€ 37.846	€ 38.603	€ 39.375	€ 40.163	€ 40.966	€ 41.785	€ 42.621	€ 43.473	€ 44.343	€ 45.230	€ 46.134	€ 47.057	€ 47.998	€ 48.958	€ 406.675	
Kilometer (per jaar)		78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	78.000	757.555	
LCOD	€ 0,84																	

Bijlage 7 Ervaringen van zes waterstofvoertuig-chauffeurs.

1. Hoe beoordeelt u het waterstofvoertuig in vergelijking met een dieselveertuig op de volgende onderdelen?

Het optreden van storingen

0	0	0	2	4
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

Het afstandsberijk

0	0	0	2	4
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

Het rijgedrag (optrekken, sturen, remmen, enzovoort).

0	0	0	0	6
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

De prestaties van het voertuig als het gaat om heffen, kiepen, persen, enzovoort.

0	0	3	0	0
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

2. Hoe beoordeelt u het waterstofvoertuig in vergelijking met een batterij-elektrisch voertuig op de volgende onderdelen?

Het optreden van storingen

0	0	2	0	3
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

Het afstandsberijk

0	0	0	0	5
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

Het rijgedrag (optrekken, sturen, remmen, enzovoort).

0	0	0	0	5
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

De prestaties van het voertuig als het gaat om heffen, kiepen, persen, enzovoort.

0	0	3	0	0
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

3. Hoe beoordeelt u het tanken van waterstof in vergelijking met het tanken van diesel op de volgende onderdelen?

Het optreden van storingen

0	2	0	1	2
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

De snelheid van tanken

1	0	1	1	2
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

Veiligheid tijdens het tanken

0	0	0	0	5
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

4. Hoe beoordeelt u het tanken van waterstof in vergelijking met het laden van een batterij-elektrisch voertuig op de volgende onderdelen?

Het optreden van storingen

0	0	2	0	4
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

De snelheid van tanken

0	0	1	1	4
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed

Veiligheid tijdens het tanken

0	0	1	0	5
Slecht	Onvoldoende	Neutraal	Voldoende	Goed