



LCA drie typen personenauto's

Een vergelijking van een
benzineauto, batterij-elektrische
auto en waterstofauto



Committed to the Environment

LCA drie typen personenauto's

Een vergelijking van een benzineauto, batterij-elektrische auto en waterstofauto

Dit rapport is geschreven door:
Mart Beeftink, Max Erich, Sanne Nusselder

Delft, CE Delft, Mei 2020

Publicatienummer: 20.190348.063

LCA / Auto's / Benzine / Batterijen / Waterstof / Milieu / Kosten

Opdrachtgever: Enpuls

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

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Sanne Nusselder (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

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

Inhoud

	Samenvatting	3
1	Introductie	7
2	Resultaten	9
	2.1 Scenario's 2020 en 2030	9
	2.2 Resultaten milieukundige analyse	10
	2.3 Resultaten kostenanalyse	14
3	Gevoeligheidsanalyses	18
	3.1 Levensduur auto	18
	3.2 Groene/grijze stroom tijdens de gebruiksfase in 2030	22
	3.3 Productie lithiumbatterij elektrische auto in 2030	23
	3.4 Efficiëntere productie waterstof in 2030	25
	3.5 Efficiëntere auto's/motoren in 2030	25
4	Conclusie en discussie	27
	4.1 Conclusies	27
	4.2 Vergelijking conclusies met andere studies	29
	4.3 Discussie	30
5	Bibliografie	32
A	Methodiek	35
	A.1 Milieu-indicatoren	35
	A.2 Datagebruik	35
	A.3 Allocatie	36
	A.4 Gebruik van software	36
B	Inventarisatie	37
	B.1 Scenario's 2020 en 2030	37
	B.2 Inventarisatie milieu-impact	39
	B.3 Inventarisatie kosten	49

Samenvatting

Doel studie

Het doel van de studie is het vergelijken van een benzineauto, een batterij-elektrische auto en een waterstofauto op het gebied van milieu-impact en kosten in 2020 en 2030. We kijken hierbij specifiek naar personenauto's uit het C-segment. We vergelijken in deze studie de volgende auto's:

- Benzineauto: Volkswagen Comfortline Golf (1.0 TSI).
- Batterij-elektrische auto: Volkswagen e-Golf (35,8 kWh in 2020 en 71,6 kWh in 2030).
- Waterstofauto: Er is nog geen waterstofauto beschikbaar die in het C-segment valt qua prijs. De Toyota Mirai is echter qua functionaliteit vergelijkbaar met beide auto's.

Scenario's 2020 en 2030

Er is een aantal aspecten dat verschilt tussen 2020 en 2030.

Tabel 1 - Scenario's 2020 en 2030 samengevat

Aspect	2020	2030
Gemiddelde elektriciteitsmix	0,37 kg CO ₂ -eq. /kWh	0,14 kg CO ₂ -eq. /kWh
Productie waterstof	Stoomreforming (SMR)	Elektrolyse op basis van elektriciteitsmix 2030
Batterijcapaciteit middenklasse elektrische personenauto	35,8 kWh (Klemola, 2019)	71,6 kWh

Elektriciteitsmix

Het PBL heeft bepaald wat de directe emissies zijn van elektriciteitsproductie bij volledige uitvoering van het klimaatakkoord (PBL, 2019). Bij deze emissies tellen wij de indirecte emissies van bijvoorbeeld de winning van aardgas en de productie van windmolens op.

Productiemethode waterstof

De huidige waterstofproductie in Nederland vindt met name plaats uit aardgas, op basis van stoomreforming (SMR). In 2030 is het echter logischer dat waterstof deels geproduceerd wordt op basis van elektrolyse. Voor 2030 gaan we uit van het positiefste scenario waarin waterstof voor 100% geproduceerd wordt met elektrolyse op basis van de gemiddelde elektriciteitsmix in 2030. Waterstofproductie op basis van SMR wél of niet inclusief afvang van CO₂ (blauwe waterstof) zou leiden tot een hogere klimaatimpact en grondstof-uitputting.

Batterijcapaciteit elektrische personenauto

Voor 2020 gaan we uit van een batterijcapaciteit van de huidige e-Golf (35,8 kWh). Verschillende onderzoeken voorspellen dat de batterijcapaciteit van een gemiddelde elektrische auto tussen nu en 2030 ongeveer zal verdubbelen (Metabolic, Copper8 ; Universiteit Leiden, 2019; IEA, 2018). Er zijn nu al elektrische auto's op de markt met zo'n batterijcapaciteit, maar die zijn niet beschikbaar voor het C-segment. Op termijn is de inschatting dat dit de standaard wordt (Zubi, et al., 2018). We gaan er daarom van uit dat dit ook geldt voor een auto in het C-segment in 2030.

Beperkingen studie

De gepresenteerde resultaten gelden voor een C-segment auto met een levensduur van 185.000 kilometer en een gemiddeld jaarkilometrage van 10.300 voor particuliere rijder en 18.200 voor een zakelijke rijder. Dit betekent dat niet gekeken is naar:

- Elektrische auto's met een grotere batterij in 2020. Zo hebben de Kia E-Niro (64 kWh batterij, D-segment) en Tesla 3 (standard range 50 kWh, D-segment), beiden een stuk hogere batterijcapaciteit.
- Een dieselauto in het C-segment omdat deze met name gebruikt worden bij een hoger jaarkilometrage.

Conclusies milieukundige analyse

2020: Elektrische auto duurzamer ná afleggen maximaal 70.000 kilometer

De milieukundige analyse laat zien dat de elektrische auto in 2020 een substantieel lagere klimaatimpact heeft en leidt tot minder grondstofuitputting dan de benzine- en waterstofauto bij een levensduur van 185.000 kilometer. Hoewel de productie van de elektrische auto (met name de batterij) een hogere klimaatimpact heeft, is de klimaatimpact in ieder geval het laagst wanneer er meer dan 70.000 km mee gereden wordt.¹

2020: Benzineauto heeft de hoogste klimaatimpact

De benzineauto heeft in 2020 de grootste klimaatimpact en leidt tot de grootste grondstofuitputting als de auto meer dan 70.000 kilometer aflegt. Dit komt door het brandstofgebruik van de benzineauto.

2020: Waterstofauto heeft een lagere klimaatimpact dan de benzineauto

De waterstofauto heeft in 2020 een hogere klimaatimpact en leidt tot een hogere grondstofuitputting dan de elektrische auto, maar heeft een lagere klimaatimpact dan de benzineauto. Hierbij is uitgegaan van waterstof die geproduceerd is op basis van steamreforming (SMR).

2030: Elektrische auto het duurzaamst ná 75.000 kilometer

Ook in 2030 heeft de elektrische auto een substantieel lagere klimaatimpact en leidt tot minder grondstofuitputting dan de benzineauto en waterstofauto. Het omslagpunt ligt bij ongeveer 75.000 kilometer in vergelijking met de waterstofauto, en bij 50.000 kilometer in vergelijking met de benzineauto.

¹ Er is een worst case-inschatting gemaakt van de klimaatimpact van de batterijproductie. Het is dus mogelijk dat het omslagpunt onder de 70.000 km ligt als de batterijproductie daadwerkelijk een lagere klimaatimpact kent.

2030: Waterstofauto waarschijnlijk minder duurzaam dan de elektrische auto

In 2030 heeft ook de waterstofauto profijt van het toenemende aandeel van groene stroom in de gemiddelde elektriciteitsmix. Dit komt omdat wij aannemen dat waterstof in 2030 geproduceerd zal worden met behulp van elektriciteit (elektrolyse) in plaats van fossiele brandstof (SMR).

Ondanks dat de waterstofauto in 2030 een significant lagere klimaatimpact heeft dan in 2020, heeft de waterstofauto nog steeds een hogere klimaatimpact dan de elektrische auto. De waterstofauto scoort in 2030 significant slechter dan de elektrische auto en benzineauto wanneer wij kijken naar grondstofuitputting.

2030: Benzineauto heeft de hoogste klimaatimpact

De benzineauto heeft in 2030 de grootste klimaatimpact en leidt tot de grootste grondstofuitputting als de auto's over de totale levensduur meer dan 50.000 kilometers afleggen.

Conclusies kostenanalyse

Elektrische en benzineauto even duur in 2020

De elektrische auto kost in 2020 meer in aanschaf dan de benzineauto en heeft daardoor hogere afschrijvingskosten. De elektrische auto weet dit in 2020 te compenseren door vrijstelling van motorrijbelasting (MRB), lagere energiekosten (electriciteit) en lagere onderhoudskosten. De aandrijflijn van de e-Golf kent immers minder draaiende delen en heeft daardoor minder onderhoud nodig dan de aandrijflijn van de benzine Golf.

Waterstofauto in 2020 tweemaal zo duur als de benzine- en elektrische auto

Het grote verschil zit met name in de afschrijving door de hogere aanschafprijs van de waterstofauto. Verzekeringspremies zijn eveneens relatief hoog door aanschafprijs en gewicht. De waterstofauto compenseert dit niet op het gebied van energie en kosten voor reparatie, onderhoud en banden, maar kent wel (net als de volledig elektrische auto) vrijstelling van motorrijbelasting.

Elektrische auto goedkoper dan benzineauto in 2030, waterstof nog steeds duurder

In 2030 is de elektrische auto een stuk goedkoper dan de benzineauto, terwijl de waterstofauto nog altijd duurder is dan de benzineauto. Naarmate er meer gereden wordt stijgt het voordeel van de elektrische auto. Dit verschil wordt veroorzaakt door de relatief lage energiekosten tijdens het gebruik van een elektrische auto.

Discussie

Er zijn twee aspecten die niet bekeken zijn in de analyse, die mogelijk wel gevolgen hebben voor de resultaten. Het gaat hierbij om:

- het niet meenemen van de infrastructuur voor de drie verschillende typen auto's;
 - het niet meenemen van het einde levensduur van de auto in de milieukundige analyse.
- De inschatting is dat beide aspecten er niet toe leiden dat de conclusies veranderen.

1 Introductie

Enpuls is een jonge organisatie van visionairs, businessdenkers en conceptontwikkelaars, die zich richten op het versnellen van de energietransitie. Omdat het transport van personen een belangrijke rol speelt in de energietransitie krijgt Enpuls veel vragen over de milieu-impact en de kosten van verschillende typen personenauto's. Enpuls heeft CE Delft daarom gevraagd om een levenscyclusanalyse (LCA) en kostenanalyse uit te voeren van drie verschillende typen personenauto's, namelijk: een benzineauto, een elektrische auto en een waterstofauto.

Doel van de studie

Het doel van de studie is het vergelijken van een benzineauto, een batterij-elektrische auto en een waterstofauto op het gebied van milieu-impact en kosten. We kijken hierbij specifiek naar kleinere personenauto's uit het C-segment middensegment met een aanschafprijs tussen de € 20.000 en € 35.000. We vergelijken in deze studie de volgende auto's:

- Benzineauto: Volkswagen Comfortline Golf (1.0 TSI).
- Batterij-elektrische auto: Volkswagen e-Golf (100 kW).
- Waterstofauto: Er is nog geen waterstofauto beschikbaar die binnen deze prijsklasse valt. De Toyota Mirai is echter qua functionaliteit vergelijkbaar met beide auto's.

In de studie kijken we naar de milieu-impact en de kosten nu (2020) en maken we een inschatting van de milieu-impact en kosten in de toekomst (2030).

Methodiek milieu-analyse: Levenscyclusanalyse (LCA)

Een LCA brengt de milieu-impact over de hele levensduur van een product of dienst in kaart. In deze LCA vergelijken we: *De productie en het gebruik in Nederland van een personenauto met een levensduur van 185.000 kilometer².*

We kijken naar twee milieu-indicatoren, namelijk: klimaatverandering en grondstof-uitputting.

Uitvoer van LCA omvat vier stappen (zie Bijlage A voor meer informatie over de gebruikte LCA-methodiek):

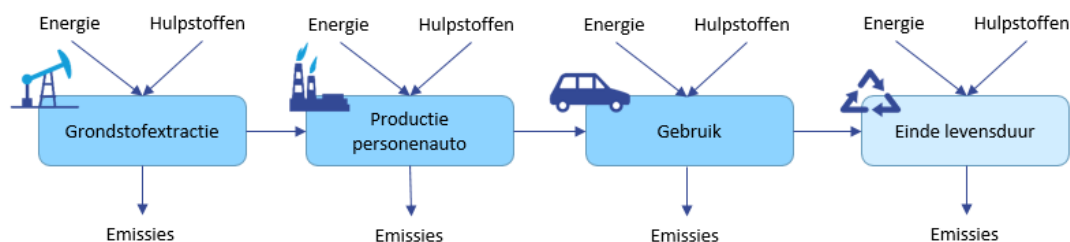
1. Vaststelling doel en reikwijdte van de studie.
2. Inventarisatie van alle milieukundige ingrepen (energiegebruik, grondstoffengebruik, etc.), emissies en nuttige outputs.
3. Interpretatie van de resultaten.
4. Gevoeligheidsanalysen en het trekken van conclusies.

Voor de LCA kijken we naar de volgende levensfasen van een personenauto: grondstof-extractie, productie van de personenauto en het gebruik van de personenauto (zie Figuur 1). Het einde van de levensduur is met name voor de waterstofauto en elektrische auto nog

² Deze levensduur is bepaald op basis van een jaarkilometrage van 10.300 km per jaar voor een particuliere rijder (CBS Statline, 2019) en een gemiddelde sloopleeftijd van aan personenauto van 17,9 jaar (CBS, 2016). Dit komt neer op 184.370 km, we ronden dit af naar 185.000. De resultaten bij een hoger of lager kilometrage van de verschillende auto's wordt bekeken in Hoofdstuk 3.

zo onzeker (omdat deze auto's nog niet grootschalig gerecycled worden) dat we ervoor kiezen om deze fase niet kwantitatief mee te nemen. We beschrijven het einde levensduur van de verschillende auto's wél kwalitatief. Ook de benodigde infrastructuur zoals tankstations en oplaadpalen worden niet meegenomen in deze studie omdat het lastig is om de bestaande infrastructuur (benzineauto) te vergelijken met de infrastructuur die op dit moment uitgerold wordt (elektrische auto) of zelfs nog nauwelijks bestaat (waterstofauto). In de discussie in Hoofdstuk 4 beschrijven wij wel in welke mate het einde levensduur en de benodigde infrastructuur invloed zullen hebben op de resultaten.

Figuur 1 - De levensfasen van een personenauto



Toelichting: De donkerblauwe levensfasen worden kwantitatief meegenomen, de lichtblauwe alleen kwalitatief.

Methodiek kostenanalyse

In de kostenanalyse gaan we uit van twee situaties. In het eerste geval wordt de gemiddelde jaarkilometrage van een particuliere automobilist gebruikt. In het tweede geval kijken we naar de gemiddelde jaarkilometrage van een zakelijk geregistreerde benzineauto. Op basis van CBS-gegevens over de afgelopen jaren (CBS Statline, 2019) wordt uitgegaan van 10.300 kilometer/jaar voor een particulier en 18.200 voor een zakelijke rijder. In beide gevallen bedraagt de totale gebruiksperiode 5 jaar.

De volgende kostenelementen worden meegenomen in de kostenanalyse:

- aanschafkosten: betreft de cataloguswaarde van de auto;
- variabele kosten: het gaat hierbij om de gebruikskosten zoals brandstof-/elektriciteitskosten en onderhoudskosten.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geven we de resultaten weer van beide analyses en in Hoofdstuk 3 beschrijven we uitgevoerde gevoeligheidsanalyses en in Hoofdstuk 4 trekken we conclusies. Uitgebreidere informatie over de gehanteerde methodiek en gebruikte gegevens zijn te vinden in respectievelijk Bijlage A en Bijlage B.

Tabel 2 - Gebruikte afkortingen

Afkorting	Beschrijving
BPM	Belasting van personenauto's en motorrijwielen
LCA	Levenscyclusanalyse
MRB	Motorrijbelasting
ROB	Kostenpost auto: reparatie, onderhoud en banden
SMR	Stoomreforming (Engels: Steam Methane Reforming)
TCO	Total cost of ownership

2 Resultaten

In dit hoofdstuk beschrijven we de resultaten. We beschrijven eerst kort de gehanteerde scenario's voor 2020 en 2030 (Paragraaf 2.1), en presenteren daarna de resultaten van de milieukundige analyse (Paragraaf 2.2) voor de milieu-indicatoren klimaatimpact (Paragraaf 2.2.1) en de grondstofuitputting (Paragraaf 2.2.2). Tot slot presenteren we de resultaten van de kostenanalyse (Paragraaf 2.3) voor zowel de aanschafprijs (Paragraaf 2.3.1) als voor de TCO (Paragraaf 2.3.2).

2.1 Scenario's 2020 en 2030

In deze studie kijken we naar zowel de huidige situatie (2020) als de situatie in de toekomst (2030). De laatste is uiteraard een inschatting. Er is een aantal aspecten dat verschilt tussen 2020 en 2030, zoals weergegeven in Tabel 14. Onder de tabel bespreken we de scenario's kort. Zie voor een uitgebreide beschrijving van de scenario's Bijlage B.

Tabel 3 - Scenario's 2020 en 2030 samengevat

Aspect	2020	2030
Gemiddelde elektriciteitsmix	0,37 kg CO ₂ -eq. /kWh	0,14 kg CO ₂ -eq. /kWh
Productie waterstof	SMR	Elektrolyse op basis van elektriciteitsmix 2030
Batterijcapaciteit middenklasse elektrische personenauto	35,8 kWh (Klemola, 2019)	71,6 kWh

Elektriciteitsmix

Op basis van de doorrekening van het klimaatakkoord door het PBL kan bepaald worden wat de ingeschatte directe emissies zijn van de elektriciteitsproductie als het klimaatakkoord volledig uitgevoerd wordt (PBL, 2019). PBL heeft daarom projecties gemaakt voor de directe emissies per kWh elektriciteit, hier tellen wij de indirecte emissies van bijvoorbeeld de winning van aardgas en de productie van windmolens bij op.

Productiemethode waterstof

De huidige waterstofproductie in Nederland vindt met name plaats uit aardgas, op basis van stoomreforming (SMR). In 2030 is het echter logischer dat waterstof geproduceerd wordt op basis van elektrolyse. Voor 2030 gaan we uit van het positiefste scenario waarin waterstof voor 100% geproduceerd wordt met elektrolyse op basis van de gemiddelde elektriciteitsmix in 2030. Waterstofproductie op basis van SMR wél of niet inclusief afvang van CO₂ (blauwe waterstof) zou leiden tot een hogere klimaatimpact en grondstofuitputting.

Batterijcapaciteit elektrische personenauto

Voor 2020 gaan we uit van een batterijcapaciteit van de huidige e-Golf (35,8 kWh). Verschillende onderzoeken voorspellen dat de batterijcapaciteit van een gemiddelde elektrische auto tussen nu en 2030 ongeveer zal verdubbelen (Metabolic, Copper8 ; Universiteit Leiden, 2019; IEA, 2018). Er zijn nu al elektrische auto's op de markt met zo'n batterijcapaciteit maar die zijn niet beschikbaar voor de middenklasse. Op termijn is de inschatting dat dit de standaard wordt (Zubi, et al., 2018). We gaan er daarom van uit dat dit ook geldt voor een middenklasse auto, zoals de e-Golf.

2.2 Resultaten milieukundige analyse

In de resultaten van de milieukundige analyse laten we zien welk deel van de milieu-impact komt door:

- **Het materiaalgebruik.** Dit zijn alle processen vanaf de grondstofextractie (bijv. mijnbouw) tot en met de productie van materialen uit deze grondstoffen zodat het materiaal gebruikt kan worden door een autofabrikant (bijv. staalproductie uit ijzererts). Al deze processen zijn inclusief transport. Het materiaalgebruik voor de batterij van de elektrische auto laten we apart zien.
- **De productie van de batterij.** Hieronder vallen het materiaal- en energiegebruik die nodig zijn voor de productie van de batterijen voor de elektrische auto. De kleinere accu's die in de benzine en waterstofauto zitten zijn niet apart weergegeven.
- **De assemblage en productie van onderdelen.** Dit is de productie van de auto-onderdelen en de assemblage van deze onderdelen tot een auto. Dit is exclusief de assemblage en productie van de batterijen van de elektrische auto, die laten we apart zien.
- **Het gebruik.** Onder gebruik van de auto verstaan wij het rijden van 185.000 kilometer met de auto. Hierbij wordt energie (brandstof of elektriciteit) gebruikt, maar wordt de auto ook onderhouden door bijvoorbeeld autovloeistoffen te vervangen of bij te vullen.

De milieu-impact van de einde van de levensduur en de infrastructuur die nodig is voor de verschillende auto's (zoals een benzinestation of elektrische laadinfrastructuur) is niet meegenomen in de kwantitatieve analyse. De inschatting is dat de impact klein is. Zie voor een bespreking van de mogelijke impact van de einde levensduur de discussie in Hoofdstuk 4.

2.2.1 Resultaten klimaatimpact

De klimaatimpact van een product of dienst wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten, de maatstaf die gebruikt wordt om de invloed op opwarming van de aarde weer te geven. Hierbij wordt de klimaatimpact van verschillende broeikasgassen bij elkaar opgeteld. Denk hierbij aan de klimaatimpact van bijvoorbeeld methaan en lachgas (N₂O). Zie Bijlage A voor een toelichting op deze milieu-indicator.

Tabel 4 en Figuur 2 laten de klimaatimpact zien van de drie verschillende auto's bij een levensduur van de auto's van 185.000 kilometers in 2020 en in 2030.

Tabel 4 - Klimaatimpact in ton CO₂-eq. per 185.000 km voor verschillende type auto's

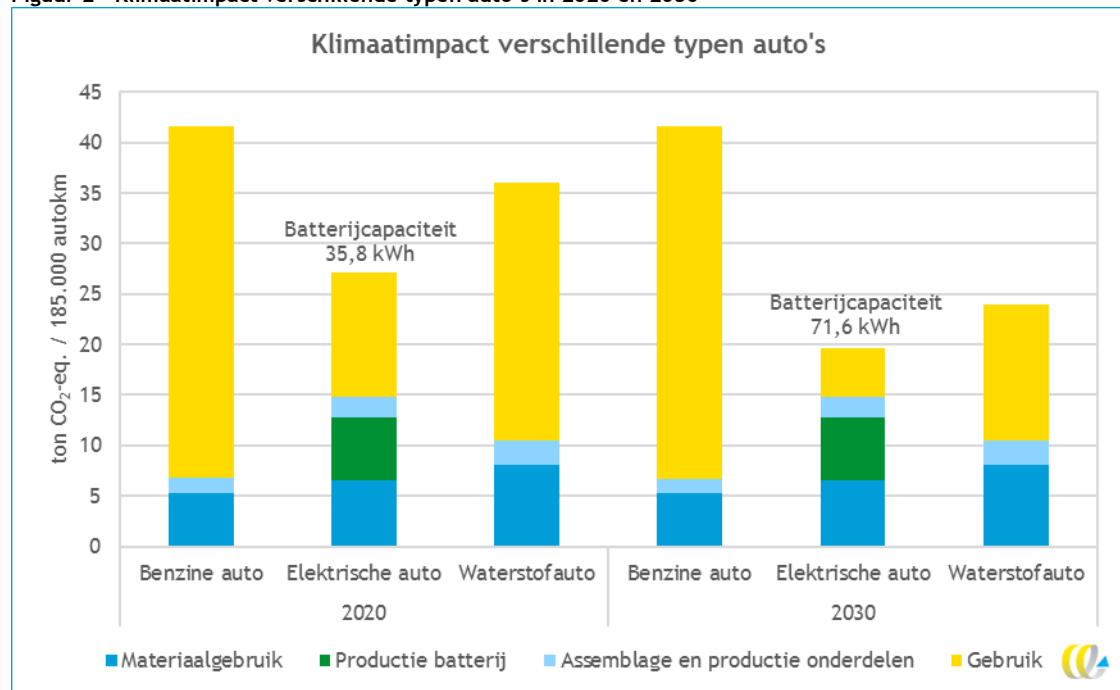
Klimaatimpact in ton CO ₂ -eq. Per 185.000 km	2020			2030		
	Benzine	Elektrisch (35,8 kWh)	Waterstof	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Materiaalgebruik (excl. batterij)	5,3	6,6	8,1	5,3	6,6	8,1
Productie batterij	–	6,2	–	–	6,2	–
Assemblage en productie onderdelen (excl. batterij)	1,5	2,0	2,4	1,4	2,0	2,4
Gebruik	34,8	12,4	25,4	34,9	4,8	13,4
Totaal	41,6	27,1	35,9	41,6	19,6	23,9

Toelichting: Materiaalgebruik, assemblage en productie van de batterij is enkel voor de elektrische auto apart weergegeven. De batterij van de waterstofauto is weergegeven onder 'Materiaalgebruik'.

Let op!: Er is een worst case-inschatting gemaakt van de productie van de batterij voor de elektrische auto in 2020. Het is mogelijk dat de klimaatimpact van de productie van de batterij daadwerkelijk lager ligt.

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Figuur 2 - Klimaatimpact verschillende typen auto's in 2020 en 2030



Toelichting: Materiaalgebruik, assemblage en productie van de batterij is enkel voor de elektrische auto apart weergegeven in het groen in de grafiek (productie batterij). De batterij van de waterstofauto is weergegeven onder 'Materiaalgebruik'.

Let op!: Er is een worst case-inschatting gemaakt van de productie van de batterij voor de elektrische auto in 2020. Het is mogelijk dat de klimaatimpact van de productie van de batterij daadwerkelijk lager ligt.

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

De resultaten laten zien dat de benzineauto in zowel 2020 als 2030 de grootste klimaat-impact heeft. Deze impact wordt voor het grootste deel veroorzaakt door het benzine-gebruik van de auto. De klimaatimpact van de benzineauto is hetzelfde in 2030 als in 2020, terwijl die van de andere twee auto's sterk afneemt.

Zowel in 2020 als in 2030 is te zien dat de klimaatimpact van de elektrische auto het laagst is. De klimaatimpact is ongeveer 30% lager in 2020 en 50% lager in 2030 dan die van een benzineauto. Dit terwijl de productie van de elektrische auto een significant hogere impact heeft dan de andere twee typen auto's door de productie van de batterij.

We schatten in dat het materiaalgebruik halveert per kWh batterijcapaciteit. Omdat de klimaatimpact van batterijen lineair toeneemt op basis van het gewicht van de batterij (Romare & Dahllöf, 2017), verwachten wij dat de klimaatimpact van de batterij niet toeneemt tussen 2020 en 2030. Dit is ondanks een voorspelde capaciteitsverdubbeling in deze periode. Omdat het duidelijk is dat de productie van de batterij belangrijk is in de vergelijking, kijken we hier verder naar in een gevoeligheidsanalyse (zie Hoofdstuk 3).

De klimaatimpact van de elektrische auto neemt af tussen 2020 en 2030 door de voorspelde toename van groene stroom in de gemiddelde elektriciteitsmix in 2030. Hoe meer kilowatt-uurs de auto's maken, hoe voordeliger de elektrische auto wordt in vergelijking met de benzine- en waterstofauto. Dit komt doordat het energiegebruik van elektrische auto (de gebruiksfase) de laagste milieu-impact heeft per afgelegde kilometer.

De waterstofauto heeft in 2020 een hogere klimaatimpact dan de elektrische auto, maar een lagere klimaatimpact dan de benzineauto. In 2030 heeft ook de waterstofauto profijt van het toenemende aandeel groene stroom in de gemiddelde elektriciteitsmix. Dit komt omdat het waarschijnlijk is dat waterstof in 2030 geproduceerd zal worden met behulp van elektriciteit (elektrolyse) in plaats van fossiele brandstof (SMR) zoals op dit moment vooral gebeurt. Ondanks dat de waterstofauto in 2030 een significant lagere klimaatimpact heeft dan in 2020, heeft de waterstofauto nog steeds een hogere klimaatimpact dan de elektrische auto in 2030. Omdat duidelijk is dat de productie van waterstof belangrijk is in de vergelijking, kijken we hier verder naar in de gevoeligheidsanalyses (zie Hoofdstuk 3).

2.2.2 Grondstofuitputting

Om de benodigde materialen en grondstoffen voor de verschillende auto's met elkaar te vergelijken berekenen wij de grondstofuitputting op basis van de ReCiPe2016-methodiek. In deze methodiek kunnen de fossiele en minerale grondstofuitputting bij elkaar opgeteld worden tot één indicator. Zie Bijlage A voor een toelichting op deze milieu-indicator.

Tabel 5 en Figuur 3 geven de grondstofuitputting weer van de drie typen auto's.

Hierbij wordt duidelijk dat gebruiksfase van de auto's dominant is. Dit komt omdat:

1. De indicator die wij gebruiken om de grondstofuitputting te bepalen uitputting van fossiele grondstoffen (en dus het gebruik van brandstoffen) zwaar meeweegt.
2. De precieze materiaalstelling van met name de overige non-ferrometalen (non-ferrometalen behalve aluminium) in de verschillende auto's niet bekend is, en we dus aannames hebben moeten doen over de samenstelling. Zie Bijlage B voor een toelichting.

In 2020 zorgt de waterstofauto dan ook voor de hoogste grondstofuitputting. Dit komt omdat er voor de productie van waterstof op basis van SMR veel aardgas nodig is. Daarnaast zien we ook dat de grondstofuitputting voor de waterstofauto in 2030 significant lager is dan in 2020. Dit komt omdat we ervan uitgaan dat waterstof in 2030 geproduceerd wordt

met behulp van elektrolyse in plaats van op basis van aardgas. Om deze reden leidt de benzineauto in 2030 tot de meeste grondstofuitputting.

Zowel in 2020 als in 2030 veroorzaakt de elektrische auto de minste grondstofuitputting van de drie bekeken auto's, ondanks de hoge impact van de productie van de auto inclusief batterij in verhouding met de benzineauto.

Tabel 5 - Grondstofuitputting in \$ per 185.000 km voor verschillende type auto's

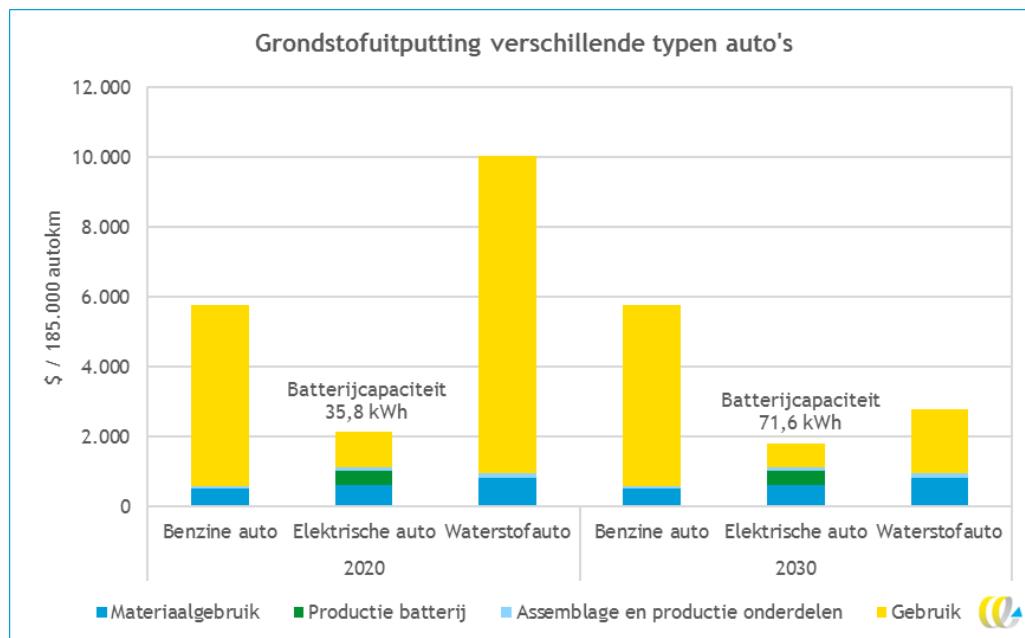
Grondstofuitputting in \$ per 185.000 km	2020			2030		
	Benzine	Elektrisch (35,8 kWh)	Waterstof	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Materiaalgebruik (excl. batterij)	521	619	832	521	619	832
Productie batterij	–	396	–	–	396	–
Assemblage en productie onderdelen (excl. batterij)	75	100	121	72	100	121
Gebruik	5.175	1.043	9.098	5.179	685	1.831
Totaal	5.771	2.158	10.050	5.771	1.800	2.784

Toelichting: Materiaalgebruik, assemblage en productie van de batterij is enkel voor de elektrische auto apart weergegeven. De batterij van de waterstofauto is weergegeven onder 'Materiaalgebruik'.

Let op!: Er is een worst case-inschatting gemaakt van de productie van de batterij voor de elektrische auto in 2020. Het is mogelijk dat de milieu-impact van de productie van de batterij daadwerkelijk lager ligt.

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Figuur 3 - Grondstofuitputting verschillende typen auto's in 2020 en 2030



Toelichting: Materiaalgebruik, assemblage en productie van de batterij is enkel voor de elektrische auto apart weergegeven. De batterij van de waterstofauto is weergegeven onder 'Materiaalgebruik'.

Let op!: Er is een worst case-inschatting gemaakt van de productie van de batterij voor de elektrische auto in 2020. Het is mogelijk dat de milieu-impact van de productie van de batterij daadwerkelijk lager ligt.

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

2.3 Resultaten kostenanalyse

Deze Paragraaf geeft de resultaten weer van onze kostenanalyse. Hierbij maken wij onderscheid in de directe kosten die gepaard gaan met de aanschaf van een auto (Paragraaf 2.3.1) en de totale (directe en indirecte) kosten over de gehele levensduur van de auto's (Paragraaf 2.3.2).

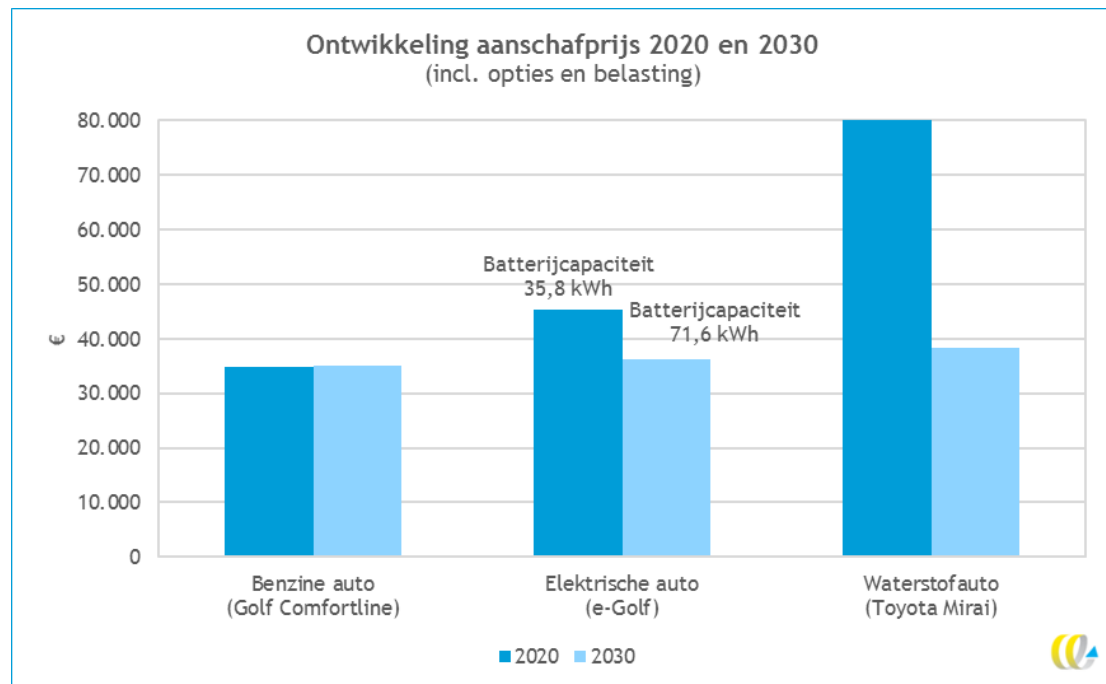
2.3.1 Aanschafprijs

In Figuur 4 is duidelijk te zien dat in 2020 de aanschafprijs van de benzineauto lager is dan die van een vergelijkbare elektrische of waterstofauto. De waterstofauto is aanzienlijk duurder omdat dit type auto nu nog nauwelijks op de markt te verkrijgen is.

De aanschafprijs van elektrische en waterstofauto's zullen naar verwachting fors dalen tussen 2020 en 2030. In 2030 nadert de elektrische auto dan ook de aanschafprijs van de benzineauto. Door een verdubbeling van de batterijcapaciteit, blijft de aanschafprijs echter nog iets boven die van de benzineauto. Zonder deze verdubbeling zou de prijs lager uitvallen. Omdat het waarschijnlijk is dat elektrische auto's aangeboden zullen worden met verschillende keuzes qua batterij(capaciteit)³ zullen de aanschafkosten ook licht variëren. De aanschafprijs van de waterstofauto daalt fors tussen 2020 en 2030. Dit komt omdat het productievolume naar verwachting zal stijgen, waardoor de kostprijs van de brandstofcel en waterstoftanks flink zal dalen. Ondanks de forse reductie in aanschafprijs is de waterstofauto in 2030 prijs alsnog iets hoger dan de elektrische en de benzineauto.

³ Zo wordt de nieuwe elektrische Volkswagen ID.3 met een 45 kWh, 58 kWh en 77 kWh batterij leverbaar.

Figuur 4 - Aanschafprijzen voor verschillende type auto's in 2020 en 2030



Toelichting: De batterij-elektrische auto heeft in 2020 een batterij met een capaciteit van 35,8 kWh en in 2030 een capaciteit van 71,6 kWh.

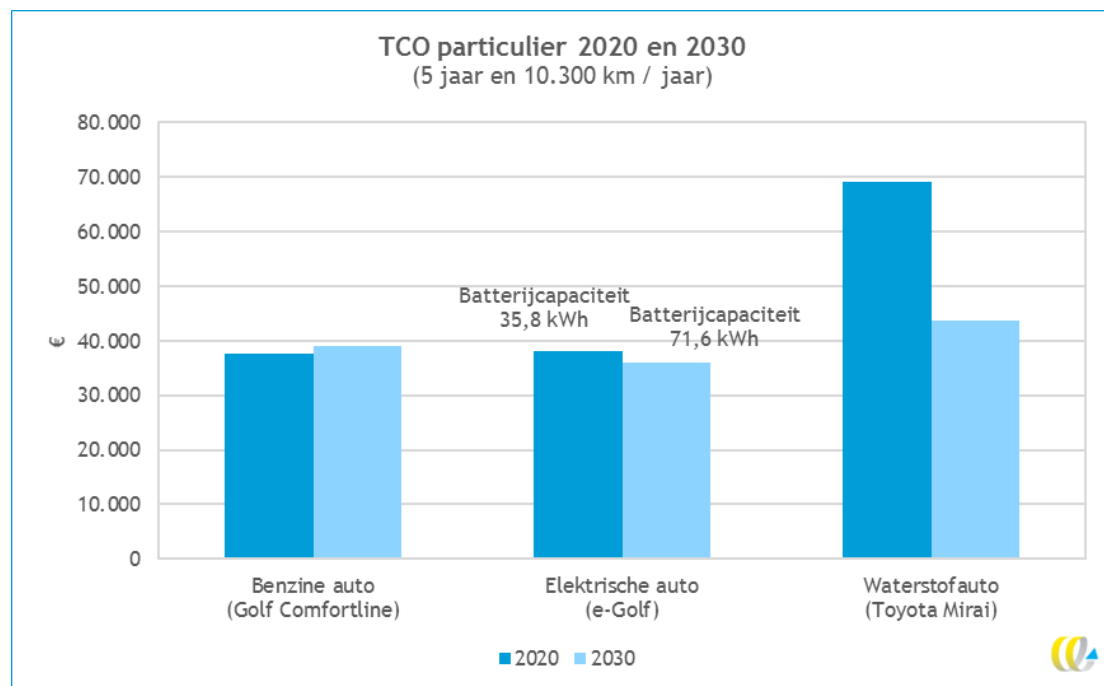
2.3.2 Total cost of ownership (TCO)

In Figuur 5 is te zien dat, wanneer je de directe en indirecte kosten van auto's meeneemt in een TCO-analyse, de elektrische en benzineauto in 2020 een vergelijkbare TCO hebben. De elektrische auto kost meer in aanschaf en heeft daardoor te maken met hogere afschrijvingskosten dan de benzineauto. De elektrische auto weet dit in 2020 te compenseren door vrijstelling van MRB, lagere energiekosten (elektriciteit) en lagere onderhoudskosten. De aandrijflijn van de e-Golf kent immers minder draaiende delen dan de aandrijflijn van de benzine Golf en is onderhoudsarm.

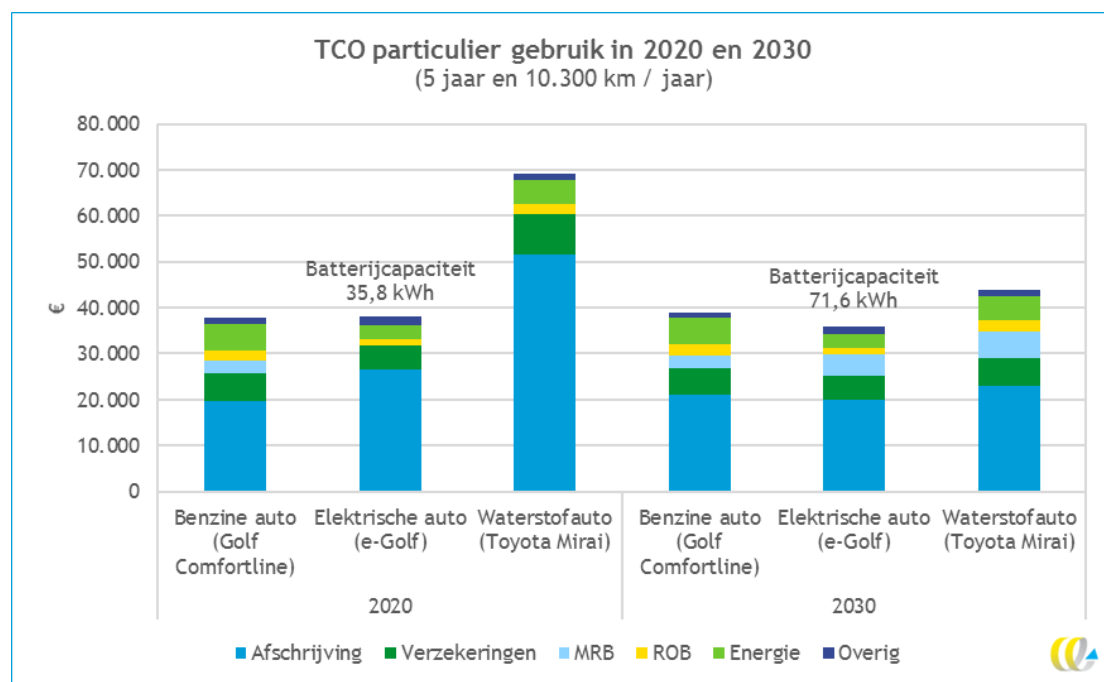
De TCO van de waterstof auto valt in 2020 bijna tweemaal zo hoog uit als die van benzine en elektrisch. Zoals te zien is in Figuur 6, zit het grote verschil met name in de afschrijving. De Mirai heeft een forse aanschafprijs, waardoor ook de afschrijvingskosten hoger uitvallen. Verzekeringspremies zijn eveneens relatief hoog door aanschafprijs en gewicht. De waterstofauto weet niet te compenseren op het gebied van energie en ROB-kosten, maar kent wel (net als de volledig elektrische auto) vrijstelling van MRB.

In 2030 is de elektrische auto een stuk goedkoper dan de benzineauto, terwijl de waterstofauto nog altijd duurder is dan de benzineauto. De inschatting is dat de elektrische auto zal in 2030 zo'n € 50 per maand goedkoper uitvallen dan de benzineauto en € 129 goedkoper dan de waterstofauto. Dit ondanks een aangenomen verdubbeling van de batterijcapaciteit tussen 2020 en 2030.

Figuur 5 - TCO particuliere rijder in 2020 en 2030



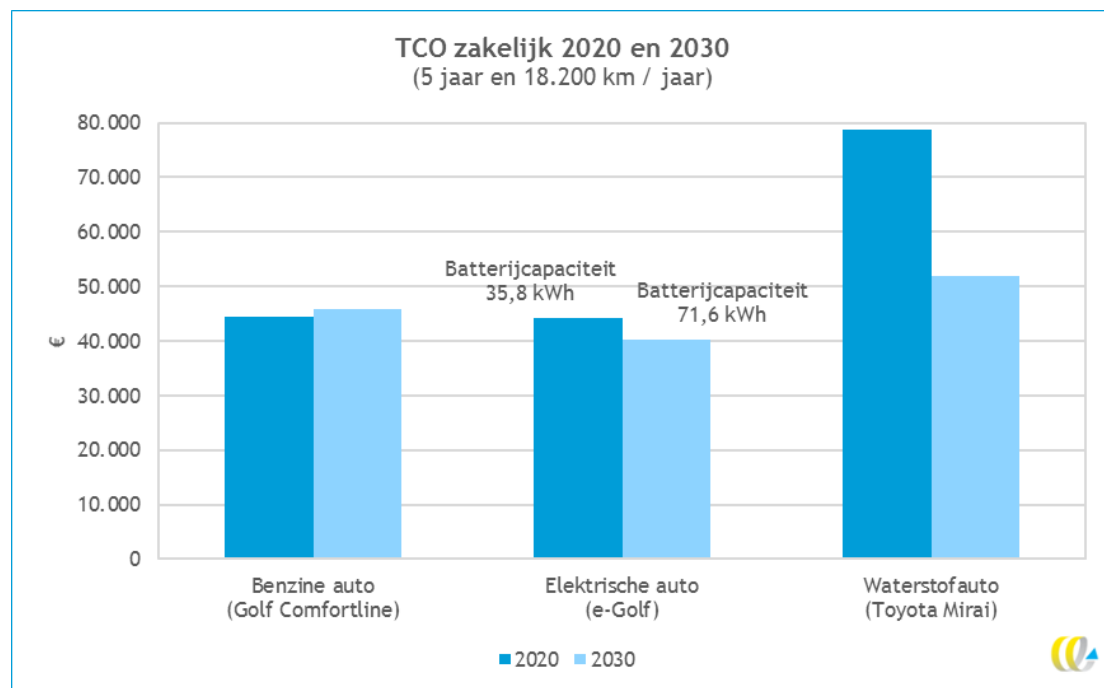
Figuur 6 - TCO particuliere rijder in 2020 en 2030 in meer detail



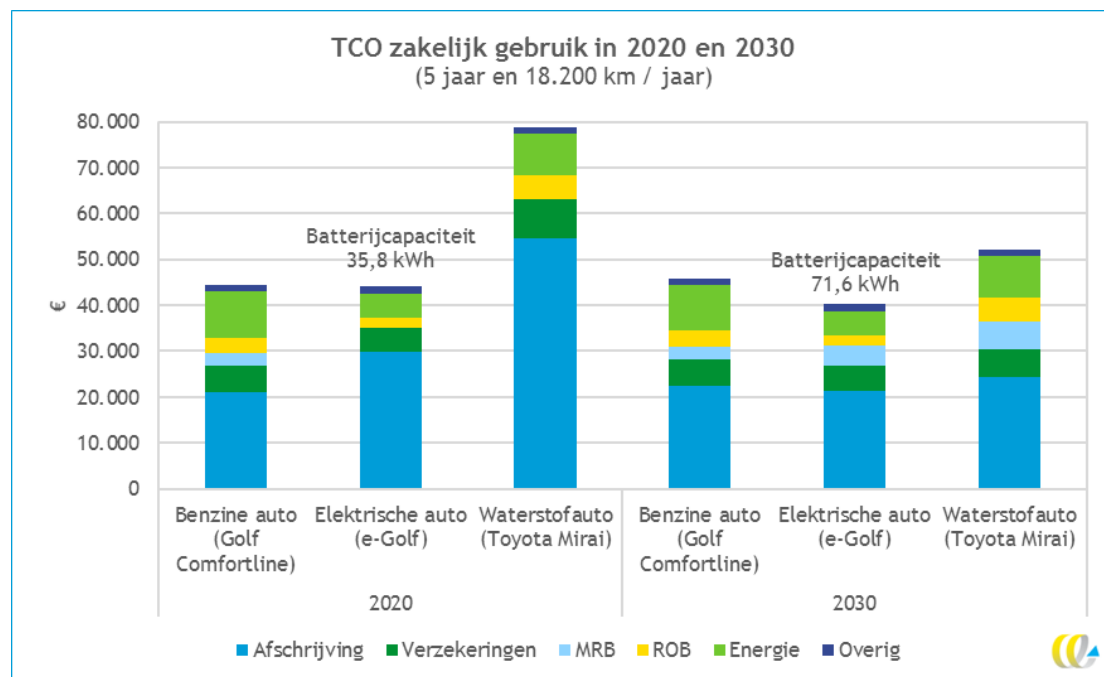
Naarmate er meer gereden wordt stijgt het voordeel van de elektrische auto. In Figuur 7 is dan ook te zien dat wanneer er meer gereden wordt, zoals het geval is bij een zakelijk auto (18.200 km/jaar), de totale kosten van alle type auto's stijgen en de verschillen tussen de type auto's groter worden (in vergelijking met Figuur 5 waar er minder gereden wordt).

Het voordeel van de elektrische auto neemt dan ook toe tot € 91 per maand t.o.v. de benzineauto en € 194 per maand t.o.v. de waterstofauto. Zoals te zien is in Figuur 8, wordt dit verschil veroorzaakt door de relatief lage energiekosten tijdens het gebruik van een elektrische auto.

Figuur 7 - TCO zakelijk rijder in 2020 en 2030



Figuur 8 - TCO zakelijke rijder in 2020 en 2030 in meer detail



3 Gevoeligheidsanalyses

In dit hoofdstuk bekijken we een aantal gevoeligheden in de uitgevoerde basisanalyse, die mogelijk leiden tot andere resultaten dan weergegeven in Hoofdstuk 2.

3.1 Levensduur auto

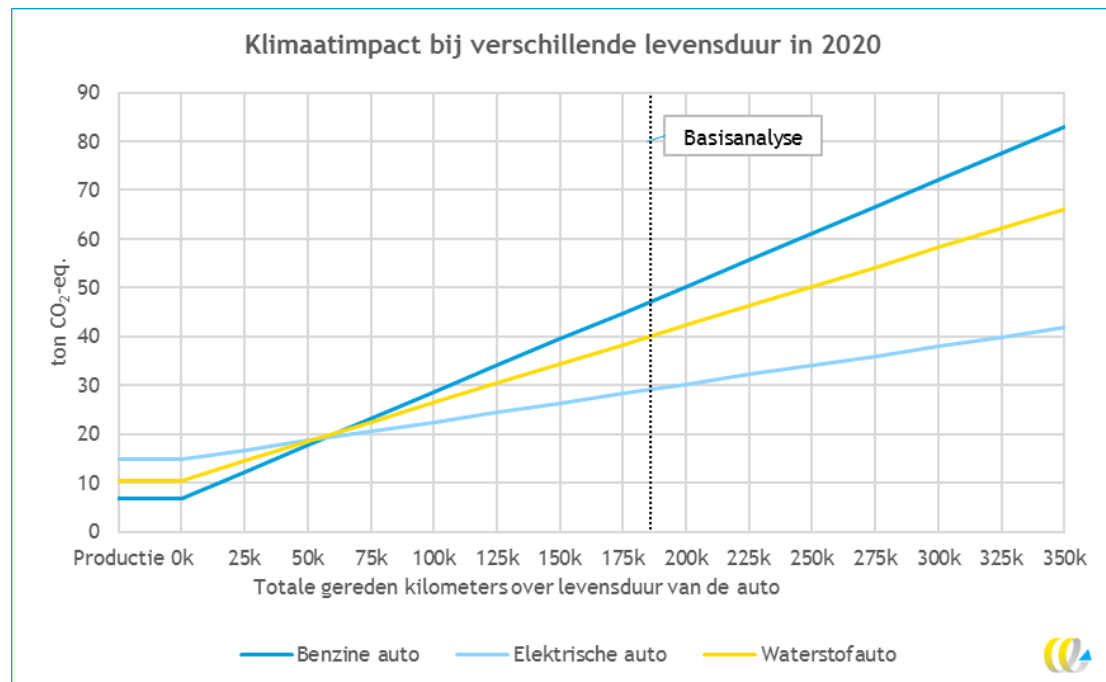
De resultaten in de basisanalyse zijn berekend op basis van 185.000 gereden kilometers. Bij een andere levensduur van de auto (een andere hoeveelheid autokilometers) veranderen deze resultaten. In het geval van een zakelijke rijder, met een jaarkilometrage van 18.200 km en een sloopleeftijd van 17,9 jaar zou het gaan om een levensduur van 325.780 km. In deze sectie kijken wij naar het effect van een andere hoeveelheid autokilometers op de klimaatimpact en grondstofuitputting.

3.1.1 Klimaatimpact

De resultaten van de klimaatimpact in 2020 en 2030 zijn weergegeven in Figuur 9 en Figuur 10, respectievelijk.

Omdat de benzineauto een lagere klimaatimpact heeft tijdens de productiefase, heeft deze auto in 2020 ook de laagste impact wanneer er tijdens de gehele levensduur minder dan 70.000 km gereden wordt. Dit betekent dat de auto's bij een jaarkilometrage van 10.300 kilometer minder dan zeven jaar gebruikt wordt. Ondanks dat de productie van de elektrische auto een hogere klimaatimpact veroorzaakt dan bij de andere type auto's, heeft de elektrische auto in 2020 de laagste klimaatimpact wanneer de auto's meer dan 70.000 km hebben gereden. Dit komt omdat de elektrische auto de laagste klimaatimpact heeft tijdens de gebruiksfase. Het verschil met de andere auto's wordt dan ook groter als er meer kilometers gereden worden.

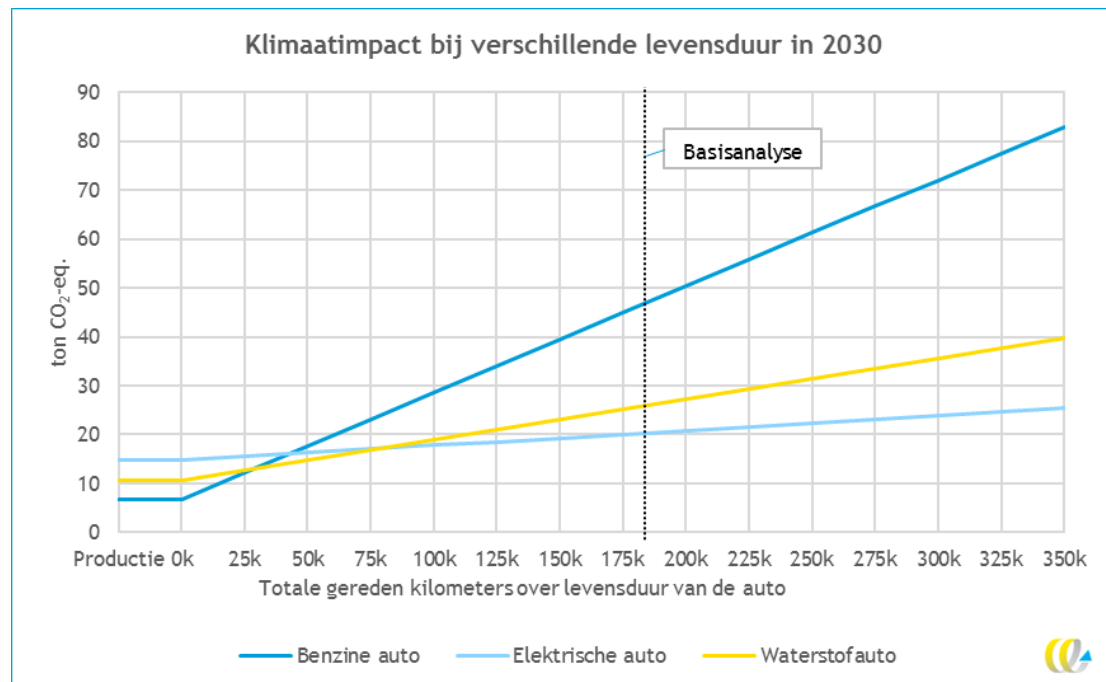
Figuur 9 - Klimaatimpact bij verschillende levensduur in 2020 voor verschillende type auto's



Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Ook in 2030 heeft de benzineauto de laagste klimaatimpact tijdens de productiefase, daarom heeft deze auto ook de laagste impact wanneer er tijdens de gehele levensduur minder dan 50.000 km worden gereden. Het verschil tussen de elektrische en waterstofauto is minder groot in 2030 dan in 2020. Dit komt omdat in 2030 waterstof geproduceerd wordt met behulp van elektrolyse in plaats van SMR en de gebruikte gemiddelde stroommix in 2030 bestaat uit een groter aandeel groene stroom dan in 2020. De elektrische auto blijft wel de laagste klimaatimpact houden zolang er meer dan 75.000 km gereden wordt tijdens de levensduur van de auto.

Figuur 10 - Klimaatimpact bij verschillende levensduur in 2030 voor verschillende type auto's

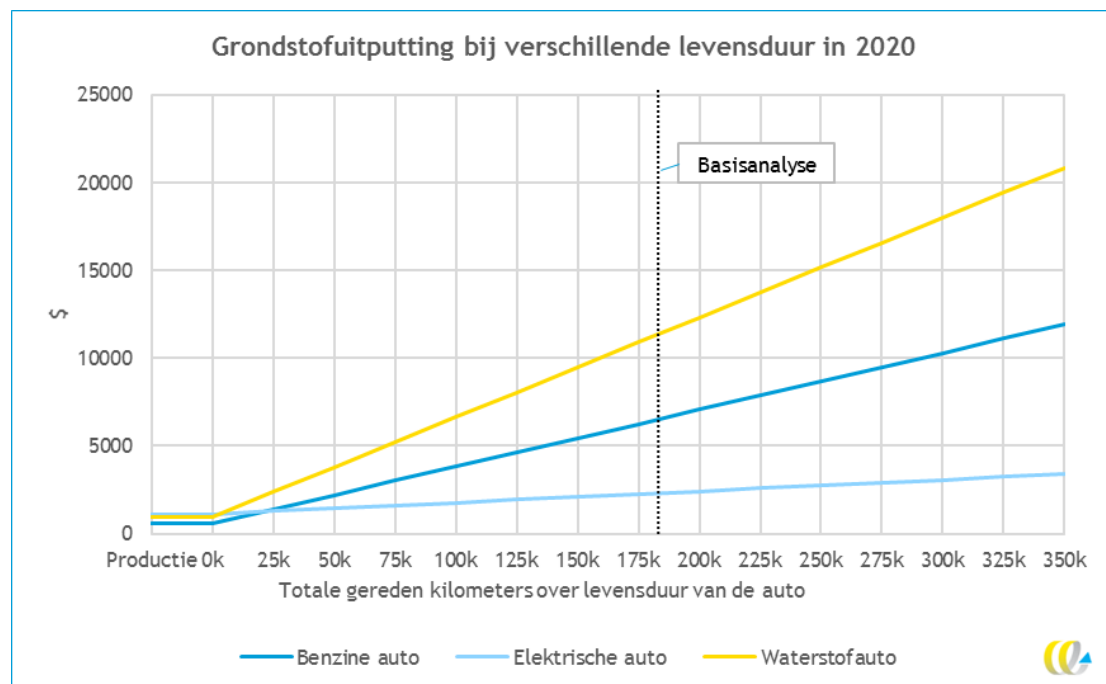


Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

3.1.2 Grondstofuitputting

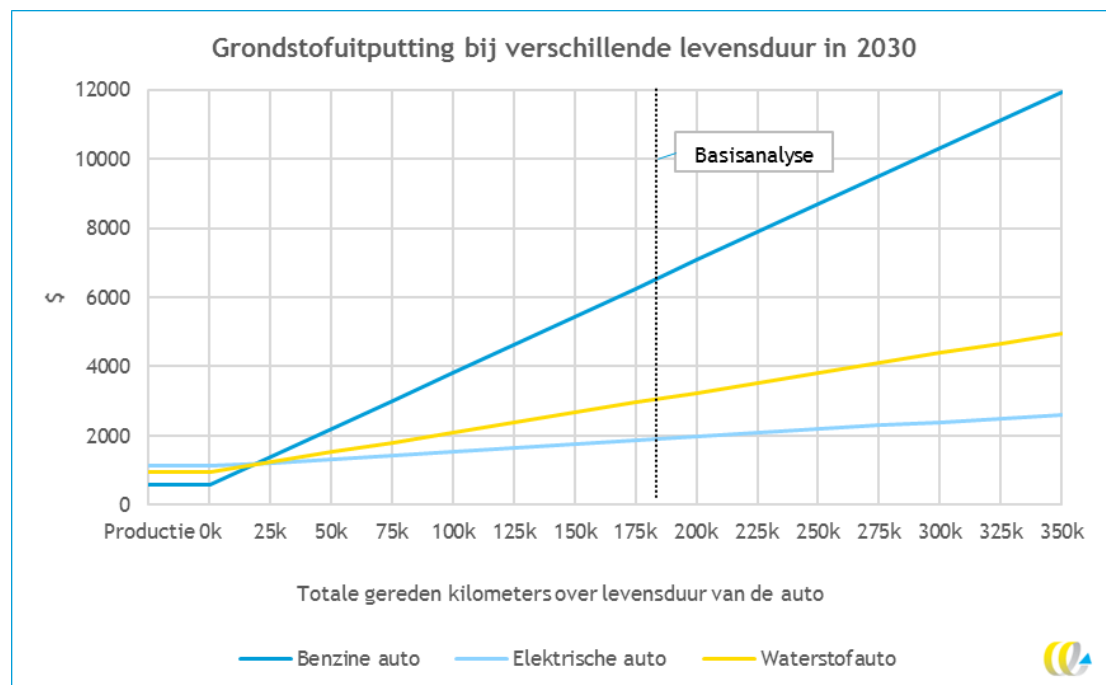
De resultaten van de grondstofuitputting in 2020 en 2030 zijn weergegeven in Figuur 11 en Figuur 12, respectievelijk. In deze figuren is dezelfde trend te zien als bij de resultaten van de klimaatimpact, alleen ligt het omslagpunt waarop de elektrische auto een lagere impact heeft eerder (rond de 20.000 km). Het verschil is dat de gebruiksfase een relatief grotere impact heeft op de resultaten dan de productie van de auto's. Dit komt omdat het gebruik van fossiele brandstoffen zwaar meetelt in de grondstofuitputting indicator. Daarnaast is te zien dat de grondstofuitputting van de waterstofauto in 2020 hoger uitvalt dan die van de benzineauto, ongeacht de levensduur van de auto.

Figuur 11 - Grondstofuitputting bij verschillende levensduur in 2020 voor verschillende type auto's



Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Figuur 12 - Grondstofuitputting bij verschillende levensduur in 2030 voor verschillende type auto's



Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

3.2 Groene/grijze stroom tijdens de gebruiksfase in 2030

In de basisanalyse gaan we ervan uit dat voor de productie van waterstof en voor het opladen van de elektrische auto gebruik gemaakt wordt van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2020 en 2030. De milieu-impact van de elektriciteitsmix zal afnemen over de levensduur van de auto, dit is niet meegenomen in de analyse omdat de mate van afnamen onzeker is. Ook de samenstelling van de mix in 2030 is nog erg onzeker.

In deze gevoeligheidsanalyse laten we de range aan resultaten zien die mogelijk zijn. De minimale milieu-impact wordt bereikt door duurzame elektriciteit te gebruiken en de maximale milieu-impact door fossiele elektriciteit te gebruiken. We kijken daarom naar:

- 100% groene elektriciteit (windenergie van zee) in 2030 - 0,01 kg CO₂-eq./kWh;
- 100% elektriciteit op basis van aardgas in 2030 - 0,39 kg CO₂-eq./kWh.

De resultaten van deze analyse zijn te zien in Tabel 6 en Tabel 7. De resultaten laten duidelijk zien dat de opwekking van (niet) duurzame elektriciteit veel effect heeft op de klimaatimpact en grondstofuitputting van elektrische auto's en waterstofauto's in 2030. Wanneer er in deze gevallen groene stroom gebruikt wordt, neemt de milieu-impact tijdens de gebruiksfase sterk af. Hierdoor gaat bij de milieu-impact vooral de productie van de elektrische en waterstofauto's, in relatieve zin, een steeds grotere rol spelen.

In 2030 is een grote reductie in klimaatimpact te zien bij de waterstofauto. Dit komt omdat wij aannemen dat waterstof in 2030 geproduceerd zal worden door middel van elektrolyse, waarvoor veel meer elektriciteit nodig is dan bij productie van waterstof uit aardgas. Wanneer de waterstofauto's in 2030 op volledig groene stroom zouden rijden in plaats van de verwachte gemiddelde mix, scoort de waterstofauto iets beter dan de elektrische auto. Dit komt omdat de milieu-impact tijdens de productie een steeds grotere rol gaat spelen, in relatieve zin, en deze impact hoger is bij een elektrische auto dan bij een waterstofauto (zie ook Figuur 2).⁴

Tabel 6 - Variatie klimaatimpact in ton CO₂-eq. per 185.000 km bij gebruik groene of grijze elektriciteit in 2030

Groene of grijze stroom tijdens gebruiksfase	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse (gemiddelde stroommix) (0,37 kg CO ₂ -eq./kWh)	41,6	19,6	23,9
Grijze stroom (0,39 kg CO ₂ -eq./kWh)	41,6	28,1	49,6
Groene stroom (0,01 kg CO ₂ -eq./kWh)	41,6	15,9	12,8

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

⁴ Wanneer er ook groene stroom gebruikt zal worden tijdens de productiefase zal dit verschil kleiner zijn, en zullen alle auto's nog beter scoren (vooral de elektrische auto). Dit is echter niet onderzocht in deze gevoeligheidsanalyse omdat wij de kans klein achten dat dit in 2030 al het geval is.

In Tabel 7 is te zien dat de relatieve veranderingen in grondstofuitputting vergelijkbaar zijn met die van de klimaatimpact (Tabel 6), al varieert de grondstofuitputting procentueel gezien meer wanneer er groene of grijze stroom gebruikt wordt. In 2030 scoren de elektrische en de waterstofauto ongeveer even goed als groene stroom gebruikt wordt.

Tabel 7 - Variatie grondstofuitputting in \$ per 185.000 km bij gebruik groene of grijze elektriciteit in 2030

Groene of grijze stroom tijdens gebruiksfase	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse (gemiddelde stroommix) (6,39E ⁻⁰⁷ \$/kWh)	5.771	1.800	2.784
Grijze stroom (2,15E ⁻⁰⁶ \$/kWh)	5.771	3.158	6.910
Groene stroom (4,11E ⁻⁰⁸ \$/kWh)	5.771	1.264	1.156

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

3.3 Productie lithiumbatterij elektrische auto in 2030

Er is een aantal onzekerheden rond de productie van de lithiumbatterij voor de elektrische auto in 2030. De belangrijkste onzekerheden in de basisanalyse voor 2030 zijn:

- De energiedichtheid (kWh/kg) van de batterijen.
- Welke materialen minder gebruikt zullen worden wanneer de energiedichtheid stijgt, en daarmee in welke mate de milieu-impact zal veranderen. De milieu-impact is namelijk per materiaal verschillend⁵.
- Het energiegebruik dat in 2030 nodig is per kWh batterijcapaciteit.

Daarnaast bestaat er nog de vraag of de batterijchemie, en dus de materiaalsamenstelling van de batterij ook veranderd richting 2030. Zo zijn lithium-luchtbatterijen en natrium-zwavelbatterijen in opkomst (Wu, et al., 2019). Om de kosten van elektrische auto's te verlagen is het echter logisch dat huidige techniek opgeschaald wordt, en dat er in 2030 nog geen gebruik gemaakt wordt van andere batterijchemie.

In de basisanalyse gaan we ervan uit dat de energiedichtheid (kWh/kg batterij) verdubbeld tussen 2020 en 2030 en dat het materiaal- en energiegebruik voor de productie van de batterij afhangt van de het gewicht van de batterij. Hierdoor blijft zowel de klimaatimpact en de grondstofuitputting van de batterijproductie gelijk wanneer de totale batterijcapaciteit in de elektrische auto verdubbelt in 2030.

In deze gevoeligheidsanalyse onderzoeken wij het effect van deze aannames en onderzoeken wij de batterijproductie in het beste geval en het slechtste geval:

- In het **slechtste geval** is er geen ontwikkeling in techniek tussen 2020 en 2030, en blijft de milieu-impact per kWh batterijcapaciteit precies hetzelfde in 2030 als deze in 2020 was. Dit betekent dat, wanneer de batterijcapaciteit van de elektrische auto's zal verdubbelen in 2030 ten opzichte van 2020, ook het materiaal- en energiegebruik (en dus de milieu-impact) zal verdubbelen.
- In het **beste geval** gaan we ervan uit dat de klimaatimpact in 2030 per kWh batterij met nog eens 30% naar beneden zal gaan omdat het productieproces efficiënter wordt per

⁵ Zo heeft bijvoorbeeld 1 kg plastic een lagere milieu-impact dan 1 kg grafiet in de batterij.

kilogram batterij⁶. In dit geval komen we uit op een klimaatimpact van ongeveer 62 kg CO₂-eq. per kWh batterijcapaciteit. Dit is gelijk aan de inschatting van (FFE, 2019) voor de minimale klimaatimpact van de productie van een batterij per kWh batterijcapaciteit.

Zie voor een uitgebreide discussie over de klimaatimpact van de productie van batterijen voor elektrische auto's Bijlage B.

In Tabel 8 en Tabel 9 zijn de resultaten samengevat van de klimaatimpact en grondstofuitputting in 2030. In deze resultaten is duidelijk te zien dat de milieu-impact van de batterijen een redelijk grote invloed heeft op de resultaten. In het slechtste geval zien wij dat de elektrische auto een iets hogere klimaatimpact heeft dan de waterstofauto, terwijl de elektrische auto nog altijd een stuk beter scoort wat betreft grondstofuitputting. In het beste geval zien wij dat de elektrische auto een wat lagere klimaatimpact en grondstofuitputting heeft en, net als in de basisanalyse, op beide aspecten het beste scoort.

Tabel 8 - Variatie klimaatimpact in ton CO₂-eq. per 185.000 km bij een andere productie van lithiumbatterijen (beste en slechtste geval)

Klimaatimpact bij een andere productie van lithiumbatterijen	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse	41,6	19,6	23,9
Beste geval: Milieu-impact per kWh batterijcapaciteit 30% lager dan in de basisanalyse	41,6	17,7	23,9
Slechtste geval: Milieu-impact per kWh batterijcapaciteit gelijk aan 2020	41,6	25,8	23,9

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Tabel 9 - Variatie grondstofuitputting in \$ per 185.000 km bij een andere productie van lithiumbatterijen (beste en slechtste geval)

Grondstofuitputting bij een andere productie van lithiumbatterijen	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse	5.771	1.800	2.784
Beste geval: Milieu-impact per kWh batterijcapaciteit 30% lager dan in de basisanalyse	5.771	1.681	2.784
Slechtste geval: Milieu-impact per kWh batterijcapaciteit gelijk aan 2020	5.771	2.196	2.784

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

⁶ Dit heeft dus effect bovenop de besparing op materiaal- en energiegebruik die veroorzaakt wordt door de verhogen van de energiedichtheid in de basisanalyse.

3.4 Efficiëntere productie waterstof in 2030

In de basisanalyse gaan wij ervan uit dat er ongeveer 51,2 kWh aan elektriciteit nodig is om 1 kg waterstof te produceren door middel van elektrolyse op basis van de huidige technologie zoals beschreven in de literatuur (Rocha, et al., 2017; Bekel & Pauliuk, 2019). In onze berekeningen voor 2030 gaan wij uit van dezelfde hoeveelheid energie. In werkelijkheid zou de productie van waterstof echter ook een stukje efficiënter kunnen worden waardoor er minder elektriciteit nodig zou zijn (FCH JU, 2014). In deze gevoeligheidsanalyse berekenen wij daarom wat de klimaatimpact van de waterstofauto zou zijn als de ontwikkeling naar 47 kWh/kg waterstof in 2030 zoals ingeschat door (FCH JU, 2014) daadwerkelijk plaatsvindt voor de productie van waterstof op basis van elektrolyse.

Zoals te zien is in Tabel 10 en Tabel 11 heeft een dergelijke efficiëntieslag geen grote invloed op zowel de klimaatimpact als de grondstofuitputting. Dit komt mede omdat wij er in de basisanalyse al van uitgaan dat waterstof in 2030 geproduceerd wordt met behulp van elektrolyse en de stroommix dan ook voor een groter aandeel bestaat uit groene stroom. Hierdoor valt er tijdens de gebruiksfase van de waterstofauto in 2030 in absolute zin minder winst te behalen dan in 2020 het geval zou zijn.

Tabel 10 - Variatie klimaatimpact in ton CO₂-eq. per 185.000 km bij efficiëntere waterstofproductie in 2030

Waterstofproductie	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse (51,2 kWh/kg H ₂)	41,6	19,6	23,9
Efficiëntere productie (47 kWh/kg H ₂)	41,6	19,6	22,9

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Tabel 11 - Variatie grondstofuitputting in \$ per 185.000 km bij efficiëntere waterstofproductie in 2030

Waterstofproductie	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse (51,2 kWh/kg H ₂)	5.771	1.800	2.784
Efficiëntere productie (47 kWh/kg H ₂)	5.771	1.800	2.645

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

3.5 Efficiëntere auto's/motoren in 2030

In de basisanalyse hebben we het energie- of brandstofverbruik bepaald aan de hand van praktijkdata. Het is goed denkbaar het energie- of brandstofverbruik zal afnemen in de toekomst door innovatie en nieuwe Europese normen (CLO, 2019). Gemiddeld worden auto's ongeveer 2% per jaar efficiënter.⁷ In deze gevoeligheidsanalyse berekenen wij de totale klimaatimpact van de drie typen auto's wanneer deze 5% efficiënter gaan rijden, dit is dus in het meest positieve geval.

⁷ In 2030 stoot een auto met een verbrandingsmotor gemiddeld 90 gram CO₂-eq. per kilometer uit (PBL, 2019), in 2017 was de gemiddelde uitstoot van nieuwe personenauto's 109 gram per kilometer (CLO, 2019). Bij een kleine

Zoals te zien is in Tabel 12 en Tabel 13, verandert er niet zo veel voor de klimaatimpact en grondstofuitputting van de verschillende type auto's wanneer deze 5% efficiënter rijden in 2030. Wel valt het op dat de klimaatimpact van de benzineauto enigszins afneemt, terwijl die van de elektrische auto zo goed als gelijk blijft. Dit is te verklaren door het verschil in klimaatimpact dat veroorzaakt wordt tijdens de gebruiksfase van de elektrische en waterstofauto enerzijds, en de benzineauto anderzijds (zoals te zien is in Figuur 2).

Tabel 12 - Variatie klimaatimpact in ton CO₂-eq. per 185.000 km wanneer de auto's 5% efficiënter rijden in 2030

Energie-/brandstofgebruik	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse	41,6 (6,6 l/100 km)	19,6 (17,3 kWh/100 km)	23,9 (1,00 kg H ₂ /100 km)
5% efficiëntere auto's	39,9 (6,3 l/100 km)	19,4 (16,5 kWh/100 km)	23,3 (0,95 kg H ₂ /100 km)

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

Tabel 13 - Variatie grondstofuitputting in \$ per 185.000 km wanneer de auto's 5% efficiënter rijden in 2030

Energie-/brandstofgebruik	2030		
	Benzine	Elektrisch (71,6 kWh)	Waterstof
Basisanalyse	5.771 (6,6 l/100 km)	1.800 (17,3 kWh/100 km)	2.784 (1,00 kg H ₂ /100 km)
5% efficiëntere auto's	5.516 (6,3 l/100 km)	1.771 (16,5 kWh/100 km)	2.697 (0,95 kg H ₂ /100 km)

Let op!: De milieu-impact van de einde levensduur en de benodigde infrastructuur zijn niet meegenomen, zie voor een bespreking van de mogelijke impact van deze aspecten de discussie in Hoofdstuk 4.

correctie voor een klein aandeel elektrische auto's komen we op 115 gram CO₂-eq. per km. Dit is dus een verwachte daling van 25 gram CO₂-eq. per kilometer tussen 2017 en 2030, oftewel iets minder dan 2% reductie per jaar.

4 Conclusie en discussie

In dit hoofdstuk beschrijven we de conclusies van deze studie (Paragraaf 4.1), vergelijken we onze conclusies met conclusies uit andere relevante studies over dit onderwerp (Paragraaf 4.2) én bespreken twee aspecten die niet bekeken zijn in de analyse die mogelijk wel gevolgen hebben voor de resultaten in een discussie (Paragraaf 4.3).

4.1 Conclusies

We bespreken hierna eerst de conclusies van de milieukundige analyse (Paragraaf 4.1.1) en daarna van de kostenanalyse (Paragraaf 4.1.2).

4.1.1 Milieukundige analyse

2020: Elektrische auto is het duurzamer ná afleggen maximaal 70.000 kilometer

De milieukundige analyse laat zien dat de elektrische auto in 2020 een substantieel lagere klimaatimpact heeft en leidt tot minder grondstofuitputting dan de benzineauto en waterstofauto. Ondanks dat de productie van de elektrische auto (met name de batterij) een hogere klimaatimpact heeft dan bij de andere typen auto's heeft de elektrische auto n ieder geval de laagste klimaatimpact wanneer er meer dan 70.000 km mee gereden wordt over de levensduur van de auto⁸. Het verschil met de andere auto's wordt groter naarmate er meer kilometers gereden worden.

2020: Benzineauto heeft de hoogste klimaatimpact

De benzineauto heeft in 2020 de grootste klimaatimpact en leidt tot de grootste grondstofuitputting als de auto's over de totale levensduur meer dan 70.000 kilometer afleggen. Dit komt door het brandstofgebruik van de benzineauto.

2020: Waterstofauto heeft een lagere klimaatimpact dan de benzineauto

De waterstofauto heeft in 2020 een hogere klimaatimpact en leidt tot een hogere grondstofuitputting dan de elektrische auto, maar heeft een lagere klimaatimpact dan de benzineauto.

2030: Elektrische auto is hoogstwaarschijnlijk het duurzaamst ná afleggen 75.000 kilometer

Ook in 2030 heeft de elektrische auto een substantieel lagere klimaatimpact heeft en leidt tot minder grondstofuitputting dan de benzineauto en waterstofauto. Het omslagpunt ligt bij ongeveer 75.000 kilometer in vergelijking met de waterstofauto, en bij 50.000 kilometer in vergelijking met de benzineauto.

⁸ Er is een worst case-inschatting gemaakt van de klimaatimpact van de batterijproductie. Het is dus mogelijk dat het omslagpunt onder de 70.000 km ligt als de batterijproductie daadwerkelijk een lagere klimaatimpact kent.

Waterstofauto waarschijnlijk minder duurzaam dan de elektrische auto in 2030

In 2030 heeft ook de waterstofauto profijt van het toenemende aandeel van groene stroom in de gemiddelde elektriciteitsmix. Dit komt omdat wij aannemen dat waterstof in 2030 geproduceerd zal worden met behulp van elektriciteit (elektrolyse) in plaats van fossiele brandstof (SMR). Ondanks dat de waterstofauto in 2030 een significant lagere klimaatimpact heeft dan in 2020, heeft de waterstofauto waarschijnlijk nog steeds een hogere klimaatimpact dan de elektrische auto.

Uit de gevoeligheidsanalyses blijkt dat de waterstofauto in 2030 in sommige gevallen net iets beter kan scoren dan de elektrische auto. Dit is het geval als:

- de klimaatimpact van batterijproductie van een elektrische auto hetzelfde blijft per kWh in 2030 als in 2020 het geval is;
- de productie van waterstof voor 100% gebeurt op basis van groene stroom.

De waterstofauto scoort in 2030 wel significant slechter dan de elektrische auto en benzineauto wanneer wij kijken naar grondstofuitputting.

2030: Benzineauto heeft de hoogste klimaatimpact

De benzineauto heeft in 2030 de grootste klimaatimpact en leidt tot de grootste grondstofuitputting als de auto's over de totale levensduur meer dan 50.000 kilometers afleggen.

4.1.2 Kostenanalyse

Elektrische en benzineauto ongeveer even duur in 2020

De elektrische auto kost in 2020 meer in aanschaf dan de benzineauto en heeft daardoor te maken met hogere afschrijvingskosten dan de benzineauto. De elektrische auto weet dit in 2020 te compenseren door vrijstelling van MRB, lagere energiekosten (electriciteit) en lagere onderhoudskosten. De aandrijflijn van de e-Golf kent immers minder draaiende delen dan de aandrijflijn van de benzine Golf en is onderhoudsarm.

Waterstofauto in 2020 tweemaal zo duur als de benzine- en elektrische auto

Het grote verschil zit met name in de afschrijving. De Mirai heeft een forse aanschafprijs, waardoor ook de afschrijvingskosten hoger uitvallen. Verzekeringspremies zijn eveneens relatief hoog door aanschafprijs en gewicht. De waterstofauto compenseert dit niet op het gebied van energie en ROB-kosten, maar kent wel (net als de volledig elektrische auto) vrijstelling van MRB.

Elektrische auto goedkoper dan benzineauto in 2030, waterstof nog steeds duurder

In 2030 is de elektrische auto een stuk goedkoper dan de benzineauto, terwijl de waterstofauto nog altijd duurder is dan de benzineauto. De inschatting is dat de elektrische auto in 2030 zo'n € 50 per maand goedkoper zal uitvallen dan de benzineauto en € 129 goedkoper dan de waterstofauto. Naarmate er meer gereden wordt stijgt het voordeel van de elektrische auto. Het voordeel van de elektrische auto neemt dan ook toe tot € 91 per maand t.o.v. de benzineauto en € 194 per maand t.o.v. de waterstof auto. Dit verschil wordt veroorzaakt door de relatief lage energiekosten tijdens het gebruik van een elektrische auto.

4.2 Vergelijking conclusies met andere studies

We vergelijken de conclusies uit deze studie met de resultaten van drie andere studies. Twee studies die specifiek naar het gebruik van elektrische voertuigen in Nederland gekeken hebben (TNO en CE Delft, 2014) (TNO, 2015) en één recente overzichtsstudie die kijkt naar een omslagpunt in gereden kilometers waarna elektrische voertuigen leiden tot een lagere klimaatimpact dan benzineauto's (FFE, 2019).

TNO en CE Delft (2014)

TNO en CE Delft hebben in 2014 een studie uitgevoerd naar verschillende typen auto's. In deze studie zijn een benzineauto, dieselauto, elektrische auto en hydride auto met elkaar vergeleken (TNO en CE Delft, 2014). De conclusies uit deze studie waren (kort samengevat):

- Bij het gebruik van de auto's voor 160.000 kilometer is de klimaatimpact per kilometer voor een benzineauto ongeveer 260 gram CO₂-eq. per gereden km en voor een volledig elektrische auto 170 gram CO₂-eq. per gereden km. Dit is bij een elektriciteitsmix van 0,47 kg CO₂-eq. per kWh.
- Bij het gebruik van de auto's voor 160.000 kilometer, de volledig elektrische auto 35% lagere CO₂-eq.-emissies heeft dan een benzineauto. Dit is bij een elektriciteitsmix van 0,47 kg CO₂-eq. per kWh.
- De CO₂-winst van elektrische auto's is sterk afhankelijk van de elektriciteitsmix, de winst kan variëren van 3% (bij 100% kolenstroom) tot 54% (bij een groot aandeel groene stroom) ten opzichte van een benzineauto.

TNO (2015)

TNO heeft in 2015 een studie uitgevoerd waarin de feiten die bekend waren in 2015 over elektrische auto's op een rijtje te zetten. In deze studie zijn een benzineauto, dieselauto, benzine hybride, plug-in hybride (PHEV) en een volledige elektrische auto met elkaar vergeleken (TNO, 2015). De conclusies uit deze studie waren (kort samengevat):

- De klimaatimpact voor de productie van de benzineauto exclusief onderhoud ligt rond de 9 ton CO₂-eq. per auto en die voor aan volledig elektrische auto op ongeveer 13 ton CO₂-eq.
- Bij het gebruik van de auto's voor 220.000 kilometer heeft de volledig elektrische auto 30% lagere CO₂-eq.-emissies heeft dan een benzineauto bij een gemiddelde elektriciteitsmix van 0,447 kg CO₂-eq./kWh.
- De CO₂-winst van elektrische auto's kan oplopen tot 70% bij het gebruik van volledig groene stroom, ten opzichte van een benzineauto.

FFE (2019)

FFE heeft in 2019 een overzichtsstudie uitgevoerd waarin een elektrische auto en een benzineauto met elkaar vergeleken worden (FFE, 2019). Een aantal relevante conclusies uit deze studie is (kort samengevat):

- De klimaatimpact voor de productie van de benzineauto exclusief onderhoud ligt rond de 7 ton CO₂-eq. per auto en die voor aan volledig elektrische auto op ongeveer 10 ton CO₂-eq. bij een batterijcapaciteit van 30 kWh.
- Bij het gebruik van een elektriciteitsmix van 0,58 kg CO₂-eq. per kWh elektriciteit ligt het omslagpunt waarna de elektrische auto leidt tot een reductie in klimaatimpact op ongeveer 50.000 kilometer.

- Bij het gebruik van groene elektriciteitsmix van 0,1 kg CO₂-eq. per kWh elektriciteit ligt het omslagpunt waarna de elektrische auto leidt tot een reductie in klimaatimpact op ongeveer 40.000 kilometer.

Onze resultaten

Onze resultaten zijn (kort samengevat) met een elektriciteitsmix van 0,37 kg CO₂-eq. per kWh in 2020:

- Bij het gebruik van de auto's voor 185.000 kilometer een klimaatimpact van ongeveer 230 gram CO₂-eq. per gereden km voor een benzineauto en 160 gram CO₂-eq. per gereden kilometer voor een elektrische auto.
- Bij het gebruik van de auto's voor 185.000 kilometer heeft de volledig elektrische auto 30% lagere CO₂-eq.-emissies heeft dan een benzineauto.
- Bij het gebruik van de auto's voor 185.000 kilometer kan de klimaatwinst van de elektrische auto ten opzichte van de benzineauto variëren van 30% (bij 100% stroom op basis van aardgas) tot 60% (bij 100% wind stroom).
- De klimaatimpact van de productie van een benzineauto ligt op ongeveer 7 ton CO₂-eq. per auto en die voor aan volledig elektrische auto in 2020 op ongeveer 15 ton CO₂-eq.
- Het omslagpunt waarna de elektrische auto in 2020 leidt tot een reductie in klimaat-impact ligt rond de 70.000 kilometer.

Vergelijking resultaten

De resultaten zoals gepresenteerd in deze studie zijn grotendeels in lijn met de resultaten uit de drie hierboven beschreven studies. Als de resultaten niet vergelijkbaar zijn, zijn de verschillen goed te verklaren vanuit het feit dat wij in deze studie een conservatieve aanpak hanteren voor de klimaatimpact van de batterij van de elektrische auto.

De verschillen zijn te verklaren door:

1. Het zuiniger worden van de benzineauto sinds 2014 zoals gerapporteerd door (TNO en CE Delft (2014) van ongeveer 7,7 liter per 100 kilometer naar 6,6 liter per 100 kilometer.
2. Een lagere klimaatimpact voor elektriciteit ten opzichte van de andere studies. Wij gaan uit van een klimaatimpact van 0,37 kg CO₂-eq. per kWh in 2020 op basis van inschatting door PBL bij het uitvoeren van het geplande klimaatbeleid (PBL, 2019).
3. Een toename in de impact van de productie van de elektrische auto door een grotere batterijcapaciteit -36 kWh in 2020 versus 24 kWh voor de Nissan Leaf in 2014 (TNO en CE Delft, 2014).
4. Een conservatieve inschatting van de klimaatimpact van de productie van de batterij van de elektrische auto in 2020.

4.3 Discussie

Er zijn twee aspecten die niet bekeken zijn in de analyse, die mogelijk wel gevolgen hebben voor de resultaten. Het gaat hierbij om:

- het niet meenemen van de infrastructuur voor de drie verschillende typen auto's, zowel in de kostenanalyse als in de milieukundige analyse;
 - het niet meenemen van het einde levensduur van de auto in de milieukundige analyse.
- We bespreken allebei deze punten in deze discussieparagraaf.

Einde levensduur

Het einde levensduur van de verschillende auto's is niet meegenomen in de analyse omdat de recyclinginfrastructuur voor de elektrische auto en waterstofauto nog niet volledig is uitontwikkeld. De Europese doelstelling voor het recyclen van een auto is om minimaal 95% van het gewicht van de auto nuttig te gebruiken. In Nederland recyclen we 98,4% van het gewicht van de auto's op dit moment (ARN, 2019b). Het is onwaarschijnlijk dat de Europese doelstelling naar beneden bijgesteld zal worden bij een toename van elektrische auto's en waterstofauto's in het verwerkingssysteem. Kortom op termijn zal bij de recycling van elektrische- en waterstofauto's hetzelfde aandeel gerecycled moeten worden als bij auto's met een verbrandingsmotor die nu gerecycled worden.

Om 95% van het gewicht van een waterstof- en elektrische auto nuttig te gebruiken zal wel expliciet aandacht besteed dienen te worden aan het recyclen van de onderdelen van de auto's die verschillen van de auto's met een verbrandingsmotor. Het gaat hierbij om de elektromotoren, batterijen, waterstofcel en additionele elektronica. Hierbij speelt met name het terugwinnen van andere typen metalen dan aanwezig in een auto met verbrandingsmotor een rol. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de metalen in de permanente magneten in de elektromotoren.

Uit literatuur blijkt dat het einde levensduur van de drie typen auto's over het algemeen verantwoordelijk is voor een zeer kleine toename in klimaatimpact over de gehele levenscyclus van de auto's (Klemola, 2019; Bartolozzi, et al., 2013). Wij verwachten dan ook niet dat wanneer het einde levensduur wél meegenomen zou worden, de eerder gepresenteerde conclusies over klimaatimpact bijgesteld zouden moeten worden.

Infrastructuur

De infrastructuur is niet meegenomen in de analyse. De meeste literatuur neemt infrastructuur ook niet mee in de analyse omdat aangenomen wordt dat het in het niet valt ten opzichte van de klimaatimpact van de productie en het gebruik van een auto. Een recente studie (Bekel & Pauliuk, 2019) waarin drie typen auto's (waterstof, elektrisch en benzine-auto) vergeleken worden voor gebruik in Duitsland laat echter zien dat de klimaatimpact echter wel terug te zien is in de resultaten. In het geval van de benzineauto gaat het om ongeveer 5% van de klimaatimpact, voor de waterstof auto ongeveer 6% en de elektrische auto ongeveer 7%. Hieruit blijkt dat het procentuele verschil tussen de benzineauto en de andere typen auto's maximaal 2% van de totale klimaatimpact is. Het kleine verschil van 2% zal er niet voor zorgen dat de eerder gepresenteerde conclusies bijgesteld moeten worden.

5 Bibliografie

- ANWB, 2019a. *Toyota Mirai Hatchback (2017-nu)*. [Online]
Available at: <https://www.anwb.nl/auto/tests-en-specificaties/detail/merk=toyota/model=/scorelijst/f86d6c3e-7ece-4993-bcf4-eeb3f4cb7c36>
[Geopend 16 12 2019].
- ANWB, 2019. *Autokosten*. [Online]
Available at: <https://www.anwb.nl/auto/kopen/auto-kiezen/autokosten>
[Geopend 19 november 2019].
- ARN, 2019a. *Wat doet ARN?*. [Online]
Available at: <https://arn.nl/wat-doet-arn/rol-van-arn/>
[Geopend 8 november 2019].
- ARN, 2019b. *Key data autorecycling 2018*, Breukelen: ARN.
- Autoweek, 2019. *Kostenberekening*. [Online]
Available at: <https://www.autoweek.nl/kostenberekening/>
[Geopend 8 januari 2020].
- Bartolozzi, I., Rizzi, F. & Frey, M., 2013. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A casestudy in Tuscany, Italy. *Applied Energy*, Volume 101, pp. 103-11.
- Bauer, C., 2010. *Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien [Life cycle assessment of lithium-ion batteries] : Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen*, Villigen: Paul Scherrer Institut, Labor für Energiesystem-Analysen.
- Bekel, K. & Pauliuk, S., 2019. Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Issue 24, pp. 2220-2237.
- BNEF, 2019. *A behind the Scenes Take on Lithium-Ion Battery Prices.*, sl: Bloomberg New Energy Finance (BNEF).
- CBS Statline, 2019. *Verkeersprestaties personenauto's; kilometers, brandstofsoort, grondgebied*. [Online]
Available at:
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80428ned/table?ts=1540904148773>
[Geopend 8 januari 2020].
- CBS, 2016. *Personenauto's steeds ouder*. [Online]
Available at: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/20/personenauto-s-steeds-ouder>
[Geopend 4 5 2020].
- Chen, Y., Hu, X. & Liu, J., 2019. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles Considering the Detailed Vehicle Components: Comparison and Scenario Analysis in China BAsed on Different Hydrogen Production Schemes. *Energies*, Issue 12, pp. 1-24.
- CLO, 2019. *CO₂-emissie per voertuigkilometer van nieuwe personenauto's, 1998-2017*. [Online]
Available at: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0134-koolstofdioxide-emissie-per-voertuigkilometer-voor-nieuwe-personenautos>
[Geopend 1 Januari 2019].
- Dunn, J. B. et al., 2012. *Material and energy flows in the materials production, assembly, and end-of-life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle*. [Online]
Available at: <https://greet.es.anl.gov/publication-lib-lca>
[Geopend 2019 December 3].
- EC, 2011. *Guidance Document n°9 on the harmonized free allocation methodology for the EU-ETS post 2012. Sector-specific guidance*, Brussels: European Commission (EC).



Ellingsen, L. A.-W. et al., 2013. Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. *Journal of Industrial Ecology*, 1(18).

Emilsson, E. & Dahllöf, L., 2019. *Lithium-Ion Vehicle Battery Production*, Stockholm, Zweden: IVL.

FCH JU, 2014. *Development of Water Electrolysis in the European Union*, Brussels: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU).

FD, 2019. Waterstof, rijdt dat een beetje?. *Financieel Dagblad*, 25 januari.

FFE, 2019. *Klimabilanz von Elektrofahrzeugen : Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit*, München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V..

Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G. & Strømman, A. H., 2012. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), pp. 53-64.

Hernandez, M. et al., 2017. Environmental impact of traction electric motors for electric vehicle applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 22, pp. 54-65.

IEA, 2018. *Global EV Outlook 2018*, Paris: International Energy Agency (IEA).

IEA, 2019. *The Future of Hydrogen : Technology report*. [Online]
Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
[Geopend 2020].

IEAGHG, 2017. *IEAGHG Technical Report 2017-02 Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS*, Cheltenham: IEAGHG.

ING, 2019. *Future residual values of battery electric vehicles benefit from increased range*, sl: ING Economics Department.

Klemola, K., 2019. *Comparison of electric cars and different internal combustion engine fuel options - Volkswagen Golf model year 2018*, Lappeenranta: Cleanfi Oy.

Leuenberger, M. & Frisknecht, R., 2010. *Life Cycle Assessment of Battery Electric Vehicles and Concept Cars*, Uster: ESU-services.

Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R. & Strømman, A. H., 2011. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles.. *Environmental Science & Technology*, 2011(10), pp. 4548-4554.

Metabolic, Copper8 ; Universiteit Leiden, 2019. *Metaalvraag van elektrisch vervoer : Op weg naar duurzaam, eerlijk en toekomstbestendig personenvervoer*. [Online]
Available at: <https://www.copper8.com/wp-content/uploads/2019/09/Metaalvraag-van-Elektrisch-Vervoer-NL-1.pdf>
[Geopend 2020].

Milford, R. L., Allwood, J. M. & Cullen, J. M., 2011. Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO2 abatement in the steel and aluminium sectors. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 55, pp. 1185-1195.

Notter, D. A. et al., 2010. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental Science and Technology*, Volume 44, pp. 6550-6556.

Papageorgopoulos, D., 2019. *Fuel Cell Technologies Office - Fuel Cell R&D Overview*., sl: US Department of Energy.

PBL, 2019. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2019*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Qiao, Q. et al., 2017. Comparative Study on Life Cycle CO2 Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China. *Energy Procedia*, Volume 105, pp. 3584-3595.

RDW, 2019. *Brandstofverbruiksboekje*,
<https://www.rdw.nl/particulier/voertuigen/auto/kopen/zuinig-en-milieuvriendelijk-voertuig-kopen>: RDW.

Rocha, L. B. et al., 2017. Design of a New Sustainable Methanol Plant Coupled to an Ethanol Distillery. *Computer Aided Chemical Engineering*, Volume 40, pp. 805-810.

Romare, M. & Dahllöf, L., 2017. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries - A Study with Focus on Current Technology and*

Batteries for light-duty vehicles, Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.

T&E, 2020. *Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles*, Brussels: Transport & Environment (T&E).

TNO en CE Delft, 2014. *Indirecte en directe CO₂-uitstoot van elektrische personenauto's*, Delft: TNO.

TNO, 2015. *Energie-en milieu-aspecten van elektrische personenauto's*, Delft: TNO.

Toyota, 2017. *2017 Mirai Product Information*, sl: Toyota.

Toyota, 2019. *Belangrijkste uitrusting Mirai*, sl: sn

USA Department of Energy, 2009. *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record*, sl: sn

USA Department of Energy, 2018. *Current Status of Hydrogen Delivery and Dispensing Costs and Pathways to Future Cost Reductions*. [Online]
Available at:
https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/18003_current_status_hydrogen_delivery_dispensing_costs.pdf
[Geopend 2020].

USEPA, 2013. *Application of life-cycle assessment to nanoscale technology : Lithium-ion batteries for electric vehicles*. Nanotechnology, Washington DC: National Service Center for Environmental Publications.

Volkswagen, 2019a. *Techniek en consumentenadviesprijzen per 1 januari 2019 - De Golf*, sl: sn

Volkswagen, 2019. *Techniek en consumentenadviesprijzen per 1 januari 2019 - De e-Golf*. [Online]
Available at: https://www.businessmobility.nl/media/documents/Prijslijst_e-Golf.b1f1bc.pdf
[Geopend 2020].

Wernet, G. et al., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(21), pp. 1218-1230.

Wu, D. et al., 2019. Intelligent Hydrogen Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 10(2)(29).

Zackrisson, M., Avellan, L. & Orlenius, J., 2010. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles : Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), p. 1519-1529.

Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M. & Pasaoglu, G., 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 89, pp. 292-308.

A Methodiek

In deze bijlage beschrijven we de eerste stap van de LCA-analyse. Het vaststellen van het doel en de afbakening (reikwijdte) van de studie. Het doel en de afbakening staan als beschreven in de Introductie (Hoofdstuk 1). De overige methodologische keuzes zijn terug te vinden in deze bijlage.

A.1 Milieu-indicatoren

In deze LCA kijken we naar de volgende twee milieu-indicatoren: klimaatverandering en grondstofuitputting.

Klimaatverandering

De klimaatimpact van een product of dienst wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten en is de maatstaf die gebruikt wordt om de invloed op opwarming van de aarde weer te geven. Om de klimaatimpact te berekenen maken we gebruik van de methodiek die ontwikkeld is door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)⁹, op basis van het vijfde IPCC-rapport. Hierbij kijken wij naar de klimaatverandering die de uitstoot van broeikasgassen (CO₂-eq.) teweegbrengt in een 100 jaar tijdshorizon. Dit betekent dat we meenemen wat de invloed de komende 100 jaar is van bijvoorbeeld een kilogram CO₂ die in 2020 uitgestoten wordt.

Grondstofuitputting

Om de benodigde materialen en grondstoffen met elkaar te kunnen vergelijken berekenen wij de grondstofuitputting op basis van de ReCiPe2016-methodiek. In deze methodiek kunnen de fossiele en minerale grondstofuitputting bij elkaar opgeteld worden tot één indicator (endpoint; \$ uitputting), waarmee de verschillende typen personenauto's vergeleken kunnen worden. De \$ uitputting wordt berekend op basis van de beschikbaarheid en vraag van verschillende grondstoffen en geeft de prijsstijging weer van een grondstof wanneer deze gebruikt wordt in een product.

A.2 Datagebruik

LCA

De belangrijkste gegevens voor dit onderzoek over het materiaalgebruik voor een personenauto en het energiegebruik voor het gebruiken van de personenauto, halen we uit literatuurstudies. Dit noemen we ook wel voorgronddata. In Bijlage B beschrijven we de gebruikte gegevens en uit welke literatuur we deze gegevens hebben gehaald.

⁹ Het IPCC is een onafhankelijke organisatie (bestaande uit duizenden wetenschappers) die op een wetenschappelijke wijze een duidelijke, transparante en objectieve evaluatie maakt van de wetenschappelijke, technische en socio-economische informatie met betrekking tot klimaatverandering.

De achtergronddata halen we uit de Ecoinvent LCA-database (v3.5). Deze database bevat milieuprofielen van materialen, elektriciteit en brandstoffen. Deze gebruiken we om bijv. het materiaal gebruikt in een personenauto te vertalen naar kg CO₂-eq. per kg materiaal.

Kostenanalyse

Gegevens over aanschafkosten en variabele kosten ontleen we aan meerdere bronnen. Het TCO-model COSTREAM dat CE Delft in beheer heeft bevat goede en actuele informatie over de (ontwikkeling) van aanschafkosten, brandstof-/energiekosten en onderhoudskosten voor benzine- en elektrische auto's. Met aanvullend literatuuronderzoek verzamelen daarnaast de overige benodigde informatie zoals kosten-informatie voor waterstofauto's.

A.3 Allocatie

Er vindt geen allocatie plaats in de voorgronddata, de allocatie voor de achtergronddata is op basis van Ecoinvent LCA-database (v3.5). Zie Paragraaf A.2 voor een toelichting op de begrippen 'voorggronddata' en 'achtergronddata'.

A.4 Gebruik van software

Om de berekeningen voor de LCA uit te voeren maken we gebruik van de SimaPro-software (v9.0). Dit is een softwareprogramma dat speciaal is ontworpen voor het uitvoeren van LCA's. Dit programma bevat databases met milieu-informatie, die gebruikt kunnen worden voor modellering van productketens, waarvan de Ecoinvent-database de grootste en meest gebruikte is.

B Inventarisatie

B.1 Scenario's 2020 en 2030

In deze studie kijken we naar zowel de huidige situatie (2020) als de situatie in de toekomst (2030). De laatste is uiteraard een inschatting. Er is een aantal aspecten dat verschilt tussen 2020 en 2030, zoals weergegeven in Tabel 14. Onder de tabel bespreken we de verschillende aspecten.

Tabel 14 - Scenario's 2020 en 2030 samengevat

Aspect	2020	2030
Elektriciteitsmix	0,37 kg CO ₂ -eq. /kWh	0,14 kg CO ₂ -eq. /kWh
Productie waterstof	SMR	Elektrolyse op basis van elektriciteitsmix 2030
Batterijcapaciteit middenklasse elektrische personenauto	35,8 kWh (Klemola, 2019)	71,6 kWh

Elektriciteitsmix

Op basis van de doorrekening van het klimaatakkoord door het PBL kan bepaald worden wat de ingeschatte directe emissies zijn van de elektriciteitsproductie als het klimaatakkoord volledig uitgevoerd wordt. PBL heeft daarom projecties gemaakt voor de directe emissies per kWh elektriciteit. We gaan in de basisanalyse uit van de gemiddelde impact van elektriciteit¹⁰. Daarnaast nemen we aan dat het invoersaldo (56 Terajoule) precies dezelfde klimaatvoetafdruk heeft als die van de in Nederland geproduceerde elektriciteit. De indirecte broeikasgasemissies bepalen we op basis van Ecoinvent v3.5 processen.

De klimaatimpact is bepaald op basis van de gegevens zoals weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15 - Klimaatimpact elektriciteit in 2020 en 2030 op basis van vastgesteld beleid

Type elektriciteit		
	Aandeel in 2020	Aandeel in 2030
Aardgas	34,5%	24,7%
Kolen	19,8%	0,0%
Overig fossiel	3,5%	2,9%
Nucleair	4,0%	3,1%
Wind	17,9%	47,4%
Zon	7,8%	18,1%
Biomassa	10,4%	2,1%
Overig	2,1%	1,6%

¹⁰ Ook wel de integrale methode genoemd.

Milieu-impact		
	2020	2030
Directe klimaatimpact (kg CO ₂ -eq. /kWh) ¹¹	0,30	0,09
Klimaatimpact inclusief ketenemissies (kg CO ₂ -eq. /kWh)	0,37	0,14

Productiemethode waterstof

De huidige waterstofproductie in Nederland vindt met name plaats uit aardgas, op basis van stoomreforming (SMR). Voor 2020 gaan we uit van deze huidige productie. De klimaatimpact per kilogram waterstof is bij huidige productie ongeveer 8,85 kg CO₂-eq. per kg waterstof (EC, 2011). Hierbij is per kilogram waterstof ongeveer 13,1 m³ aardgas nodig¹² en 0,156 kWh elektriciteit¹³.

In 2030 is het echter logischer dat waterstof geproduceerd wordt op basis van elektrolyse. Voor 2030 gaan we daarom uit van productie op basis van elektrolyse op basis van de gemiddelde elektriciteitsmix zoals besproken in de vorige paragraaf. Per kg waterstof is ongeveer 51,2 kWh elektriciteit nodig (Rocha, et al., 2017). Dit energieverbruik is vergelijkbaar met de 51,0 kWh elektriciteit per kg waterstof waar Bekel & Pauliuk (2019) van uitgaan. De waterstof wordt geproduceerd onder een druk van 200 bar.

Naast dat de waterstof geproduceerd moet worden, moet het ook gecomprimeerd worden. Het huidige openbare operationele waterstofstation in Nederland, in de buurt van Rotterdam, levert waterstof onder een druk van 700 bar¹⁴. Hiervoor is het nodig om de waterstof te comprimeren van de 200 naar 900 bar en te koelen. Volgens Bekel & Pauliuk (2019) is daarbij gecombineerd 1,21 kWh nodig per kg waterstof. Ook dit komt in de buurt van gegevens die elders te vinden zijn, zo geeft USA Department of Energy (2009) aan dat voor compressie van 0 naar 700 bar ongeveer 1,36 kWh elektriciteit nodig is per kilogram waterstof (USA Department of Energy, 2009). We gaan uit van de hoogste inschatting van 1,36 kWh/kg waterstof.

Batterijcapaciteit elektrische personenauto

Er is vanuit de markt behoefte aan een grotere batterijcapaciteit. Verschillende onderzoeken voorspellen dat de batterijcapaciteit van een gemiddelde elektrische auto tussen nu en 2030 ongeveer zal verdubbelen en tussen de 70 en 80 kWh capaciteit uit zal komen (Metabolic, Copper8 ; Universiteit Leiden, 2019; IEA, 2018). Er zijn nu al elektrische auto's op de markt met zo'n batterijcapaciteit maar die zijn niet beschikbaar voor de middenklasse. Op termijn is de inschatting dat dit de standaard wordt (Zubi, et al., 2018). We gaan er daarom van uit dat dit ook geldt voor een middenklasse auto, zoals de e-Golf.

De e-Golf die gebruikt is in deze studie voor 2020 heeft een beperkte actieradius van ~210 km. In 2030 betekent dit dus dat we uitgaan van een actieradius van ongeveer 420 km.

¹¹ Zoals weergegeven in Tabel 13 van (PBL, 2019).

¹² Op basis 75% efficiëntie van de chemische reactie en een dichtheid van aardgas van 0,656 kg/m³ aardgas.

¹³ Berekend op basis van (IEAGHG, 2017).

¹⁴ Zie: <https://www.tankpro.nl/brandstof/2014/09/04/eerste-openbare-waterstof-station-in-nederland-van-start/>

Deze actieradius is dan vergelijkbaar met die van de Toyota Mirai (475 km) maar nog altijd minder dan die van de Golf Comfortline (757 km)¹⁵.

B.2 Inventarisatie milieu-impact

We beschrijven de inventarisatie van de milieu-impact per stap in de levenscyclus van de auto: grondstofextractie (Paragraaf B.2.1), productie personenauto (Paragraaf B.2.2), gebruik (Paragraaf B.2.3) en einde levensduur (Paragraaf B.2.4).

B.2.1 Grondstofextractie

Benodigde materialen benzine en elektrische auto

Voor de elektrische auto en de benzineauto is er een overzicht beschikbaar van het materiaal dat in de twee typen Golf aanwezig is (Klemola, 2019). De materiaalinhoud is daarbij exclusief de vloeistoffen die nodig zijn tijdens het gebruik van de auto's (remvloeistof, ruitenwisservloeistof, etc.). Deze vloeistoffen nemen we mee onder de gebruiksfase (zie Paragraaf B.2.3).

Tabel 16 - Materiaalinhoud benzineauto en elektrische auto

Materialen	Volkswagen e-Golf 100 kW (excl. batterij) (kg/auto)	Batterij Volkswagen e-Golf - 35,8 kWh capaciteit (kg/auto)	Volkswagen Golf Comfortline 1.0 TSI 85 kW (kg/uto)
PE	13,43	0,00	16,31
PP	62,11	14,85	83,51
PS	38,95	3,96	34,11
PET	33,10	0,00	29,38
PVC	16,96	0,00	15,05
Andere plastics	38,16	0,00	33,86
Lijmen	6,22	12,21	4,03
Aluminium	96,28	71,61	73,18
Overige non-ferrometalen - Koper, mangaan, kobalt, nikkel etc. ¹⁶	50,17	81,18	36,68
Ruwijzer	3,54	0,00	24,10
Gietijzer	5,25	0,00	131,88
Staal	826,37	0,33	651,72
Mineralen (klei)	3,39	0,00	5,92
Glas	35,44	0,00	31,78
Rubber (banden)	20,73	0,00	10,06
Rubber (niet-banden)	9,82	0,00	18,39
Zwavelzuur	0,41	0,00	1,68
Lithium	0,60	4,62	0,00

¹⁵ Toyota Mirai rijdt 500 km volgens data leverancier op basis van een verbruik van 0,95 kg H₂/100 km. Dit hebben wij aangepast naar het praktijkverbruik van 1,0 kg H₂/100 km. Golf Comfortline op basis van 50 liter tank en het praktijkverbruik van 6,6 liter benzine/100 km (zie Paragraaf B.2.3).

¹⁶ We nemen aan dat de non-ferrometalen voor 2/3^{de} bestaan uit koper, voor 1/9^{de} uit mangaan, 1/9^{de} kobalt en 1/9^{de} nikkel. Voor de non-ferrometalen gebruikt in de batterij van de e-Golf gaan we uit van een andere samenstelling namelijk; ½ koper, 1/6^{de} kobalt, 1/6^{de} mangaan en 1/6^{de} lithium.

Materialen	Volkswagen e-Golf 100 kW (excl. batterij) (kg/auto)	Batterij Volkswagen e-Golf - 35,8 kWh capaciteit (kg/auto)	Volkswagen Golf Comfortline 1.0 TSI 85 kW (kg/uto)
Grafiet	8,00	61,38	0,00
Water	11,54	79,86	3,32
Totaal	1.280,47	330,00	1.288,36

Bron: (Klemola, 2019).

Benodigde materialen waterstofauto

De materiaalinhoud voor een waterstofauto is niet beschreven in de literatuur, ook niet voor de Toyota Mirai waar vrij veel informatie over beschikbaar is. We maken daarom gebruik van een aantal aannames die we hieronder bespreken.

Tabel 13 geeft het belangrijkste verschil in onderdelen weer tussen de verschillende typen auto's. Zoals aangegeven zit het verschil tussen de benzineauto en de waterstof auto met name in het verschil in motor, waterstofcel, tank en de hoeveelheid elektronica in de auto. Op basis van deze gegevens kunnen we een auto definiëren die géén verbrandingsmotor en brandstoftank heeft, waarbij de materialen voor de specifieke onderdelen van de waterstofauto opgeteld kunnen worden.

Tabel 13 - Versimpeld verschil in onderdelen tussen de auto's types

Onderdeel	Benzineauto	Elektrische auto	Waterstof auto
Aandrijflijn en transmissie	Verbrandingsmotor	Elektromotor	Elektromotor
Batterij	Kleine batterij (12V): Loodaccu	Grote batterij: Lithiumbatterij Kleine batterij (12V): Loodaccu	Waterstofcel Grote batterij: NiMH-batterij Kleine batterij (12V): Loodaccu
Tank	Brandstoftank	Niet van toepassing	Waterstoftank
Elektronica en bedrading	Kleine hoeveelheid elektronica boord-computer	Grote hoeveelheid elektronica	Middelgrote hoeveelheid elektronica

Volgens Leuenberger & Frishknecht (2010) weegt de verbrandingsmotor van een Volkswagen Golf 57 kilogram waarvan 42 kilogram aluminium en 15 kilogram staal. De brandstoftank van een benzineauto weegt ongeveer 0,55 kg per liter brandstofinhoud waarvan 36% bestaat uit aluminium en 64% uit epoxyvezels. Bij een tankinhoud van 50 liter heeft een benzineauto dus een brandstoftank met een gewicht van 27,5 kilogram.

Bartolozzi et al. (2013) hebben een studie uitgevoerd waar de onderdelen van een waterstofauto die afwijken van die van een benzineauto apart zijn gedefinieerd. Het gaat hierbij om de waterstofcel, waterstoftank, batterij, elektromotor en extra elektronica. Het materiaalgebruik van deze onderdelen uit deze studie behalve die van de batterij tellen we bij elkaar op en voegen we toe aan de benzineauto zonder verbrandingsmotor en brandstoftank. Hierbij gaan we van het volgende uit:

- Volgens Bartolozzi, et al. (2013) weegt een waterstoftank 30 kilogram en zijn er twee waterstoftanks benodigd. Ook de Toyota Mirai heeft twee tanks, maar het totaalgewicht van de tanks is ongeveer 87,5 kg (Toyota, 2017). We rekenen daarom met omgerekend 2,92 tanks zoals deze gedefinieerd zijn door Bartolozzi.

- We scharen het platina, de elektronische componenten, ferriet en permanente magneten net als koper onder de non-ferrometalen.
- We scharen PFTE-polymeer en glasvezel onder overige plastics. Glasvezel is uiteraard geen plastic maar zou ook vervangen kunnen worden door epoxyvezel, wat wel een plastic is.
- We scharen silica onder mineralen.

Voor de productie van de NiMH (nickel-metaalhydride) batterij gaan we uit van gegevens voor de lithium batterij van de elektrische auto. Dit omdat het logischer is dat er in de toekomst gekozen gaat worden voor een lithium batterij dan voor een NiMH-batterij én omdat we dan geen extra onzekerheid introduceren door een verschil in datakwaliteit met betrekking tot batterijen. Het totale gewicht van de batterij in de Toyota Mirai is volgens Chen, et al. (2019) 22,1 kilogram.

In Tabel 17 geven we een overzicht van de materiaalinhoud van de waterstofauto zonder vloeistoffen.

Tabel 17 - Materiaalinhoud waterstofauto

Materialen	Benzineauto Zie Tabel 16 (kg/auto)	Vermindering onderdelen benzineauto	Hoeveelheid aangepast naar gewicht Toyota Mirai	Toevoeging onderdelen waterstofauto	Waterstofauto
PE	16,31		23,11	0,00	23,11
PP	83,51		118,35	0,99	119,35
PS	34,11		48,34	0,27	48,61
PET	29,38		41,64	0,00	41,64
PVC	15,05		21,33	0,00	21,33
Andere plastics	33,86	- 17,60 (tank)	23,04	61,06	84,10
Lijmen	4,03		5,71	0,82	6,53
Aluminium	73,18	- 42,00 (motor) - 9,90 (tank)	30,16	34,00	64,15
Overige non-ferrometalen (koper, mangaan, kobalt, nikkel, etc.)	36,68		51,98	55,60	107,59
Ruwijzer	24,10		34,15	0,00	34,15
Gietijzer	131,88		186,90	0,00	186,90
Staal	651,72	- 15 (motor)	902,37	85,06	987,34
Mineralen (klei)	5,92		8,39	0,50	8,89
Glas	31,78		45,04	0,00	45,04
Rubber (banden)	10,06		14,26	0,00	14,26
Rubber (niet-banden)	18,39		26,06	0,00	26,06
Zwavelzuur	1,68		2,38	0,00	2,38
Lithium	0,00		0,00	0,31	0,31
Grafiet	0,00		0,00	18,11	18,11
Water	3,32		4,71	5,35	10,05
Totaal	1.204,96	- 84,50	1.587,93	+ 262,07	1.850,00

Bronnen: Voor de benzineauto zonder vloeistoffen zie Tabel 16, voor vermindering zie toelichting boven tabel (op basis van (Leuenberger & Frishknecht (2010) en voor toevoeging zie toelichting boven tabel (Bartolozzi, et al. (2013).

Extra materiaal nodig door verliezen tijdens productie

Tijdens de productie van de auto gaat er altijd materiaal verloren. Bijvoorbeeld in snijverliezen. Het precieze verlies per grondstof is lastig te bepalen omdat het om zoveel verschillende onderdelen gaat. We gaan er daarom van uit dat er per materiaal zoals gedefinieerd in Tabel 16 en Tabel 17 ongeveer 10% meer nodig is om deze hoeveelheid materialen uiteindelijk in de auto terecht te laten komen¹⁷.

B.2.2 Productie personenauto

Productie auto-onderdelen

Een auto bestaat uit heel veel verschillende auto-onderdelen. Zoals eerder ook aangegeven onder grondstofextractie hoeven we bij de vergelijking tussen de verschillende typen auto's alleen te kijken naar het verschil in componenten, voor de rest nemen we aan dat de productie van de componenten vergelijkbaar is. Dit betekent dat we apart kijken naar het energiegebruik voor de productie van de volgende componenten:

- benzineauto: verbrandingsmotor, brandstoftank, kleine boordcomputer;
- elektrische auto: elektromotor, lithiumbatterij, uitgebreide boordcomputer;
- waterstofauto: elektromotor, waterstofcel, polymeerbatterij, waterstoftank, middelgrote boordcomputer.

Tabel 18 geeft een overzicht van het energiegebruik voor de productie van verschillende auto-onderdelen. Onder de tabel beschrijven we deze onderdelen in meer detail.

Tabel 18 - Energiegebruik productie auto-onderdelen

Onderdeel	Benzineauto	Elektrische auto	Waterstof auto
Aandrijflijn en transmissie	Verbrandingsmotor: 12,89 kWh	Elektromotor: 73,8 kWh elektriciteit en 224,1 MJ warmte	Elektromotor: 32,0 kWh elektriciteit en 97,1 MJ warmte
Batterij	Niet van toepassing	Batterij: 5.544,132 kWh	Waterstofcel: 108,5 kWh Batterij: 56 kWh
Tank	40 kWh	Niet van toepassing	40 kWh per tank, voor 2,92 tanks dus 116,8 kWh
Elektronica en bedrading	1,22 kWh/kg	1,22 kWh/kg	1,22 kWh/kg

Verbrandingsmotor - benzineauto

Voor de assemblage van de verbrandingsmotor van de benzineauto is volgens Hawkins et al. (2012) 12,89 kWh elektriciteit nodig.

Elektromotor - elektrische auto

Hernandez et al. (2017) hebben een studie uitgevoerd naar de productie van elektromotoren voor elektrische auto's. Zij geven aan dat er 0,492 kWh elektriciteit en 0,415 kWh warmte nodig is voor de productie van een elektromotor per kilogram. Bij een gewicht van 150 kilogram komt dat neer op 73,8 kWh elektriciteit en 224,1 MJ warmte.

¹⁷ Volgens (Milford, et al., 2011) gaat tussen de 10 en 32% materiaal verloren tijdens de productie van een autodeur. We gaan uit van het laagste verliespercentage voor het gebruik van alle materialen in een auto.

Elektromotor - waterstofauto

Volgens Bartolozzi et al. (2013) is voor de productie van een elektromotor voor de waterstofauto 40 kWh elektriciteit benodigd. Chen et al. (2019) gaan uit van 0,144 kWh per kg elektromotor. Bij een gewicht van 65 kilogram elektromotor, zou dit neer komen op ongeveer 9,4 kWh elektriciteit. Bekel en Pauliuk (2019) geven echter aan dat de productie van een elektromotor voor een waterstofauto erg vergelijkbaar is met de van de elektrische auto. We gaan daarom voor de basisanalyse uit van het elektriciteitsgebruik en warmtegebruik voor de productie van de elektromotor van een elektrische auto.

Lithiumbatterij - elektrische auto

Er zijn veel studies uitgevoerd naar de klimaatimpact van de productie van lithiumbatterijen. De resultaten van deze studies variëren echter sterk door verschillen in onder andere: batterijontwerp, hoeveelheid beschikbare data en productiestappen die meegenomen worden in de analyse (Romare & Dahllöf, 2017). Hierdoor geven de bronnen allemaal andere informatie over de klimaatimpact van batterijen voor een elektrische auto. Ellingsen et al. (2013) hebben een overzichtsstudie uitgevoerd waar energiegebruik voor de productie van batterijen voor auto's bekeken is. De onderzochte studies rapporteren een grote range aan benodigde energie voor productie en assemblage tussen de 0,86 kWh en 295 kWh per kWh batterijcapaciteit. Ellingsen rekende ook het energieverbruik uit met behulp van voorgrond data (directe data van de fabriek) en kwam uit op 163 kWh per kWh batterijcapaciteit (voornamelijk elektriciteit). Hierbij wordt een groot deel van de energie verbruikt in de droogkamers.

Volgens Romare and Dahllöf (2017), kunnen de grote verschillen in energiegebruik in Tabel 19 verklaard worden door het verschil in top-down of bottom-up benadering. Waarbij de top-down benaderingen een completer beeld geven van het energieverbruik dan de bottom-upbenaderingen. Hierdoor komt het energiegebruik vaak hoger uit bij een top-down-benadering. Dit komt omdat er bij een top-downbenadering meestal de hele fabriek wordt geanalyseerd en daardoor alle (ook de minder zichtbare) processen in die fabriek meegenomen worden die een rol spelen bij de productie van de batterijen. Een nieuwere studie komt uit op een inschatting van de klimaatimpact van een batterij tussen de 61 en 106 kg CO₂-eq./kWh batterijcapaciteit (Emilsson & Dahllöf, 2019).

In een recente overzichtsstudie over klimaatimpact van een batterij voor een elektrische auto door FFE (2019) is beschreven dat de klimaatimpact van het materiaalgebruik van een batterij voor een elektrische auto ongeveer 62 kg CO₂-eq. per kWh capaciteit is. De auteurs stippen aan dat de verschillen in de klimaatimpact in de literatuur met name komen door het energiegebruik voor de productie van de batterij en het kengetal dat gehanteerd wordt aan de klimaatimpact voor dit energiegebruik. FFE geeft aan dat de productie van een lithiumbatterij in één moderne fabriek in China ongeveer 50 kWh per kWh batterijcapaciteit vraagt. FFE (2019) verklaart dat de range van literatuurwaarden die Romare and Dahllöf (2017) komt door de mate van opschaling van de productie van de batterijen.

Ook T&E (2020) noemen een wijde range aan klimaatimpact van batterij (55 tot 185 kg CO₂-eq. per kWh batterijcapaciteit) waarbij het verschil te verklaren is door (1) het aantal laadcycli van de batterij, (2) de efficiëntie van de batterij en (3) de energiedichtheid van de batterij.

Om een worst case inschatting te maken voor 2020, maken we gebruik van de waarde van Ellingsen et al (2013) voor productie in 2020 (163 kWh/kWh batterijcapaciteit). We nemen in de analyse aan dat dit energieverbruik helemaal uit elektriciteit bestaat en dat de klimaatimpact 0,75 kg CO₂-eq. per kWh elektriciteit is. Door deze gegevens te combineren komen

we uit op een klimaatimpact van ongeveer 173 kg CO₂-eq. per kWh batterijcapaciteit in 2020. Deze waarde ligt binnen de range van 55 tot 185 kg CO₂-eq. per kWh batterijcapaciteit zoals ingeschat door (T&E, 2020).

Een overzicht van het energieverbruik tijdens de productie en assemblage van een batterij op basis van verschillende LCA-studies is te vinden in Tabel 19.

Tabel 19 - Elektriciteitsgebruik per kWh batterij en gebruikte methode voor acht verschillende LCA-studies over lithiumbatterijen (Ellingsen, et al., 2013) (FFE, 2019)

Bron	Energieverbruik voor productie en assemblage batterij (kWh/kWh batterijcapaciteit)	Top-down/Bottom-up
(Notter, et al., 2010)	0,86	Bottom-up
(Bauer, 2010)	91–295	Onbekend
(Zackrisson, et al., 2010)	125	Top-down
(Majeau-Bettez, et al., 2011)	103–131	Top-down
(Dunn, et al., 2012)	2,97	Bottom-up
(USEPA, 2013)	0–7,86	Bottom-up
(Ellingsen, et al., 2013)	163	Top-down
(FFE, 2019)	50	Top-down
Gekozen waarde	50	

De batterij van de Volkswagen e-Golf in 2020 heeft een capaciteit van 35,8 kWh (Klemola, 2019). Als we het energieverbruik per kWh batterijcapaciteit omrekenen naar een batterij met een capaciteit van 35,8 kWh dan komen we uit op een totaal energieverbruik van 5.835 kWh voor deze batterij.

Bloomberg New Energy Finance schat in dat de gemiddelde batterijcapaciteit per kilogram batterij ongeveer verdubbeld tussen 2020 en 2030 (BNEF, 2019). Wij nemen aan dat als de gemiddelde batterijcapaciteit per kilogram batterij ongeveer verdubbelt, het materiaalverbruik zal halveren per kWh batterijcapaciteit.¹⁸ Dit houdt in dat als de range van de auto in 2030 verdubbelt, terwijl het materiaalverbruik per kWh batterijcapaciteit halveert, er in 2030 evenveel materiaal nodig voor de productie van de batterij als in 2020. Volgens Romare & Dahllöf (2017) neemt de klimaatimpact van batterijen lineair toe op basis van gewicht van de batterij. In 2030 gaan we er daarom van uit dat bij een verdubbeling van de batterijcapaciteit naar 71,6 kWh, bij een gelijkblijvend gewicht, energiegebruik en materiaalgebruik voor deze batterij, de klimaatimpact gelijk blijft. Dit betekent dat we uitkomen op 86,5 kg CO₂-eq. per kWh batterijcapaciteit in 2020.

Omdat er veel onzekerheden zijn over de ontwikkelingen van batterijen in de komende jaren, variëren wij de klimaatimpact van de batterijproductie in een gevoeligheidsanalyse (zie Hoofdstuk 3).

¹⁸ Na navraag bij experts lijkt dit een realistische aanname. Wel met de kanttekening dat wij aannemen dat alle materiaal in gelijke mate verminderen door nieuwe technologie, terwijl in de realiteit vooral het gebruik van de niet-actieve materialen in de batterij zal verminderen en het gebruik van actieve materialen ongeveer hetzelfde zal blijven.

Batterij - waterstof auto

De Toyota Mirai maakt gebruik van een Nickelbatterij (NiMH hydride) (Toyota, 2017). Er zijn geen gegevens van Toyota bekend over het gewicht van deze batterij. Volgens (Chen, et al., 2019) is het gewicht van deze batterij 22,1 kilogram. Dit lijkt een goede inschatting als we dit narekenen; de Toyota Mirai heeft een batterij met een capaciteit van $\sim 1,6 \text{ kWh}^{19}$, en bij een energiedichtheid van $0,07 \text{ kWh/kg}$ (Wu, et al., 2019) komen we uit op 22,8 kilogram batterij. We gaan in de berekening uit van de 22,1 kg van Chen, et al. (2019). Chen, et al. (2019) gaan uit van een energiegebruik van 2,53 kWh per kilogram batterij, dit betekent dus een totaal van ongeveer 56 kWh voor de productie van de batterij.

Waterstofcel - waterstofauto

Volgens Bartolozzi, et al. (2013) is voor de productie van een waterstofcel voor de waterstofauto 40 kWh elektriciteit benodigd. Chen, et al. (2019) gaat uit van 1,53 kWh per kg waterstofcel. Bij een gewicht van 60 kilogram waterstofcel, zou dit neer komen op ongeveer 108 kWh elektriciteit. Dit is veel hoger. We gaan voor de basisanalyse uit van de hoogste inschatting.

Brandstoftank en waterstoftank

Volgens Bartolozzi, et al. (2013) is voor de productie van de waterstoftank 40 kWh elektriciteit benodigd. Omdat de waterstoftank qua samenstelling (aluminium en een verstevigende vezel) niet veel afwijkt van die van de brandstoftank voor een benzineauto, gaan we uit van dezelfde energiebehoefte per tank.

Elektronica

Er is geen specifieke informatie bekend over het energiegebruik voor de productie van de elektronica in de verschillende typen auto's. Wél specificeert (Chen, et al., 2019) dat er voor verschillende elektronische componenten in de waterstofauto ongeveer 1,22 kWh elektriciteit nodig is voor de productie. We nemen aan dat dit voor alle drie de typen auto's van toepassing is en gaan ervan uit dat de alle 'overige non-ferrometalen' aanwezig zijn in elektronica met uitzondering van het gewicht aan 'overige non-ferrometalen' in de batterij van de elektrische auto (81,18 kg/auto) en het gewicht aan 'overige non-ferrometalen' in de elektromotor, batterij en brandstofcel in de waterstofauto (41 kg/auto). Het gaat dan om:

- elektrische auto: $51,17 \text{ kg} \times 1,22 \text{ kWh/kg}$ staat gelijk aan 62,4 kWh elektriciteit;
- benzineauto: $36,68 \text{ kg} \times 1,22 \text{ kWh/kg}$ staat gelijk aan 44,7 kWh elektriciteit;
- waterstofauto: $48,85 \text{ kg} \times 1,22 \text{ kWh/kg}$ staat gelijk aan 59,6 kWh elektriciteit.

Assemblage personenauto

Onder assemblage verstaan we het in elkaar zetten van de personenauto uit verschillende onderdelen. Het gaat hierbij om het verplaatsen en deels aan elkaar lassen van onderdelen evenals het spuiten van de lak. We nemen bij dit onderdeel ook het energiegebruik voor airconditioning, licht en verwarming in de fabriek mee.

Uit de literatuur zijn geen gegevens bekend over het daadwerkelijke energieverbruik voor het in elkaar zetten van de verschillende onderdelen van een personenauto. Wel geven verschillende bronnen aan dat het productieproces tot een vergelijkbare klimaatimpact leidt. Volgens Qiao et al. (2017) is het productieproces van een middelklasse benzine- en

¹⁹ 244 V met een capaciteit van 6,5 Ah.

elektrische auto vergelijkbaar en leiden beiden tot een uitstoot van 1.064,1 kg CO₂-eq. Ook op basis van de Ecoinvent-database (Wernet, et al., 2016) komen we tot een vergelijkbare klimaatimpact.

Tabel 20 - Energiegebruik nodig voor het assemblage van de verschillende type auto's

	Benzineauto (Wernet, et al., 2016)	Elektrische auto (Wernet, et al., 2016)	Waterstofauto (Chen, et al., 2019)
Elektriciteitsgebruik	1,49 kWh/kg	1,47 kWh/kg	1,91 kWh/kg
Warmtegebruik	1,59 MJ/kg	1,49 MJ/kg	2,03 MJ/kg

B.2.3 Gebruik - Energiegebruik en onderhoud

Tijdens de gebruiksfase gebruiken de verschillende typen auto's ook verschillende hoeveelheden energie/brandstoffen. Het onderhoud verschilt ook iets. Voor het verbruik van energie/brandstoffen tijdens de gebruiksfase gaan we hierbij uit van praktijkgegevens zoals weergegeven in Tabel 21.

Tabel 21 - Input per type personenauto tijdens de gebruiksfase

	Benzineauto	Elektrische auto	Waterstofauto
Energie-/brandstof-gebruik	6,6 liter benzine/100 km	17,3 kWh/100 km	1,0 kg H ₂ /100 km
Motorolie	3,9 kg/auto (Klemola, 2019) 12 keer bijvullen ²⁰	N.v.t.	N.v.t.
Remvloeistof	0,9 kg/auto (Qiao, et al., 2017) 5 keer bijvullen (aannee elke 3 jaar, bij gemiddeld jaarkilometrage van 10.300 km/jaar)		0,9 kg/auto (Chen, et al., 2019) Aanname: gelijk aan benzine en elektrische auto
Smeerolie	1,13 kg/auto (Klemola, 2019) 1 keer bijvullen (Qiao, et al., 2017)	7,02 kg/auto (Klemola, 2019) 1 keer bijvullen (Qiao, et al., 2017)	3,90 kg/auto (Chen, et al., 2019) Aanname: gelijk aan benzine en elektrische auto
Koelvloeistof	3,39 kg/auto (Klemola, 2019) 3 keer bijvullen (Qiao, et al., 2017)	4,01 kg/auto (Klemola, 2019) 3 keer bijvullen (Qiao, et al., 2017)	10,4 kg/auto (Chen, et al., 2019) Aanname: gelijk aan benzine en elektrische auto
Ruitenwisservloeistof	2,7 kg/auto (Qiao, et al., 2017) 19 keer bijvullen (Qiao, et al., 2017)		2,7 kg/auto (Chen, et al., 2019) Aanname: gelijk aan benzine en elektrische auto
Bandenvervang	Elke 36.000 km, dus 4 keer		

Benzineauto

Op basis van praktijkgegevens is te bepalen dat de Volkswagen Golf Comfortline 1.0 TSI, 80-90 kW ongeveer 6,6 liter benzine per 100 km verbruikt (ANWB, 2019). Dit is hoger dan wat aangegeven wordt in de LCA uitgevoerd voor Volkswagen (Klemola, 2019), waar uitgegaan wordt van 5,7 liter per 100 km.

²⁰ Volkswagen geeft aan dat de motorolie ongeveer elke 15.000 kilometer vervangen moet worden (Volkswagen, 2019). Dat komt bij een levensduur van 185.000 kilometer uit op 12 keer bijvullen van de motorolie.

Elektrische auto

Op basis van praktijkgegevens is te bepalen dat de e-Golf met een 100 kW motor ongeveer 17,3 kWh elektriciteit per 100 km verbruikt (ANWB, 2019). Dit is hoger dan wat aangegeven wordt in de LCA uitgevoerd voor Volkswagen (Klemola, 2019), waar uitgegaan wordt van 15,6 kWh per 100 km.

Waterstofauto

Over het gebruik van waterstofauto's zijn in Nederland nog een stuk minder praktijkgegevens beschikbaar dan voor een benzine- of elektrische auto. Toyota geeft aan dat de Toyota Mirai een verbruik heeft van 0,94 kg H₂ per 100 km (RDW, 2019). Volgens de ANWB gebruikt de Toyota Mirai in de praktijk 1 kg H₂ per 100 km (ANWB, 2019a). We gaan uit van 1,0 kg per km.

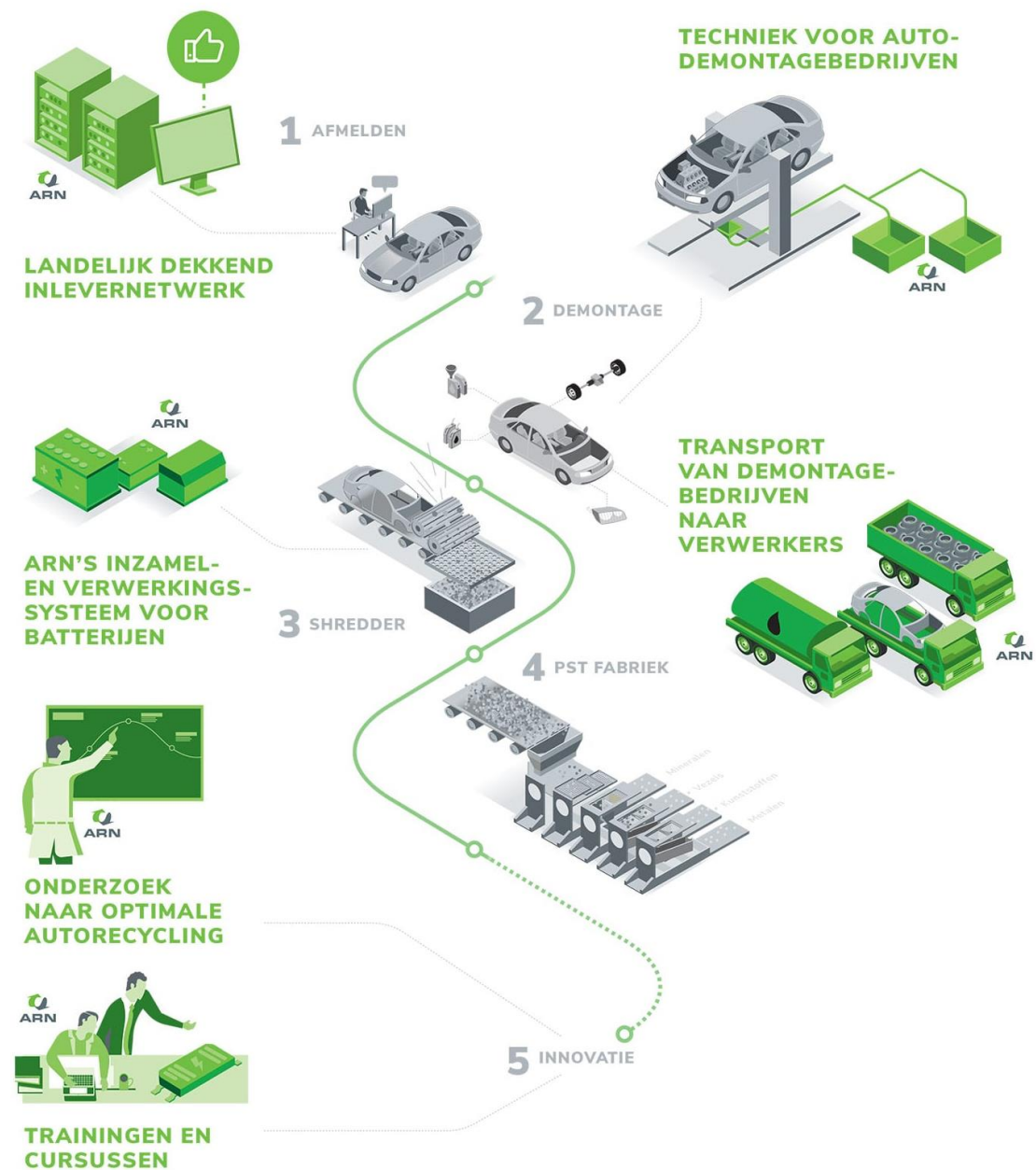
B.2.4 Einde levensduur

Aan het einde van de levensduur van de verschillende auto's, zullen de auto's ingeleverd worden bij een auto demontagebedrijf om te recyclen. Auto Recycling Nederland (ARN) is verantwoordelijk voor de verwerking van auto's in Nederland, zij hebben veel gegevens beschikbaar voor de huidige personenauto's (benzine, diesel). Omdat batterij-elektrische auto's en waterstofauto's nog niet zo lang beschikbaar zijn op de markt is hier een stuk minder over bekend. Het algemene verwerkingssysteem zal er echter vergelijkbaar uitzien.

Zoals weergegeven in Figuur 14 wordt een personenauto na afmelden eerst gedemonteerd bij een demontagebedrijf, vervolgens vormalen (shredder) om metalen terug te winnen en tot slot komt het residu bij ARN in de PST-fabriek²¹ waar ook nog een deel van de metalen en kunststoffen wordt teruggewonnen voor recycling.

²¹ PST staat voor post shredder treatment.

Figuur 14 - Stappen in auto recycling



Bron: (ARN, 2019a).

Ook in deze fase zit het verschil tussen de verschillende typen auto's met name in een aantal componenten. Op dit moment worden de specifieke componenten van een waterstof auto een elektrische auto nog niet zo goed verwerkt als die van een benzineauto. Dit is logisch, want het verwerkingsysteem is ontwikkeld voor auto's met een verbrandingsmotor. Hoe de verwerking van een elektrische auto en waterstof auto er in de toekomst uitziet, is natuurlijk onbekend.

We bespreken de verschillende componenten hier opnieuw apart. Door een tekort aan kwantitatieve gegevens, kan de verwerking van deze componenten niet meegenomen worden in LCA-analyse.

Verbrandingsmotor - benzineauto

Bij demontage wordt het motorblok verwijderd en in sommige gevallen opnieuw verkocht als tweedehands onderdeel, of specifiek verkocht als oud ijzer.

Elektromotor - elektrische auto

Er is nog weinig bekend over hoe de elektromotoren van de twee typen auto's verwerkt worden. Het vermoeden is dat deze niet uit de auto verwijderd worden tijdens de demontagefase om te kunnen verkopen als onderdeel, maar in plaats daarvan bij een autoshreder terecht komen. Bij de autoshreder worden met name metalen teruggewonnen. Het is onbekend welke metalen er precies afgescheiden worden; worden bijvoorbeeld de permanente magneten die speciale metalen bevatten teruggewonnen en gerecycled?

Lithiumbatterij - elektrische auto

Volgens ARN heeft tot nu toe 90% van de batterijen uit elektrische auto's een tweede leven gekregen in een stationaire toepassing (ARN, 2019b). De vraag is of er aan het einde levensduur van elektrische auto's die in 2020 op de markt komen ook nog zoveel vraag is naar batterijen voor deze toepassing.

Elektromotor, waterstofcel - waterstofauto

De eerste waterstofauto's zijn pas begin 2015 op de Nederlandse markt gekomen²². Er is dus ook nog geen enkele waterstofauto die aangemeld is voor sloop in Nederland. Hoe de verwerking van de elektromotor en waterstofcel er dus uit gaat zien is nog onbekend.

Elektronica

Het terugwinnen van alle (zeldzame) materialen uit elektronica is ingewikkeld en gebeurt om economische en technische reden ook niet. Omdat er meer elektronica zit in een waterstofauto en een elektrische auto dan in een benzineauto kan verwacht worden dat er minder materiaal teruggewonnen wordt uit elektronica dan bij een benzineauto. Hoe de verwerking van elektronica zich ontwikkelt in de toekomst en of elektronica apart teruggewonnen gaat worden uit auto's moeten we nog zien.

B.3 Inventarisatie kosten

In dit deel van het rapport vergelijken we investeringen en kosten voor bezit en gebruik van een benzineauto, een elektrische auto en een auto op waterstof.

²² Zie voor cijfers: [EVConsult: EV Monitor personenauto's](#).

B.3.1 Aanschafkosten

2020

Bij het vergelijken van de aanschafkosten is het noodzakelijk om de auto's eerst qua uitrusting en prestaties zo goed mogelijk vergelijkbaar te maken. In het geval van de benzine kijken we naar de benzine 1.0 TSI (85 kW) versie. Deze versie accelereert iets minder snel dan de e-Golf, maar beschikt wel over een hogere topsnelheid. Gekozen is voor een benzineauto met automatische versnellingsbak (DSG), aangezien er ook in de e-Golf en Mirai niet zelf geschakeld hoeft te worden.

Qua uitrustingsniveau zijn er voor de benzine Golf meerdere mogelijkheden. Het niveau 'Comfortline Business' is geselecteerd omdat deze het best aansluit bij de standaard-uitrusting van de e-Golf. Verder zijn een aantal opties toegevoegd om verschillen in uitrusting zoveel mogelijk te elimineren. Dit is eveneens het geval ten opzichte van de Toyota Mirai. Die is namelijk standaard rijk uitgerust. Hierdoor moet de prijs van zowel de benzine als elektrische Golf opwaarts gecorrigeerd worden. Overigens moet wel de opmerking gemaakt worden dat door keuzes van fabrikanten sommige opties niet altijd beschikbaar zijn voor alle modellen. De Mirai is bijvoorbeeld voorzien van een verwarmbare achterbank en stuurwiel. Deze opties zijn voor de VW Golf niet beschikbaar.

Tabel 22 - Vergelijking aanschafprijzen benzine, batterij-elektrisch en waterstof (juli 2019)

Categorie	Benzine	Batterij-elektrisch	Waterstof
Modelnaam en versie	VW Golf (VII) 1.0 TSI 85 kW DSG Comfortline Business	VW e-Golf	Toyota Mirai
Basisprijs incl. btw en BPM	€ 30.475	€ 40.325	€ 80.935
Opties	LED plus koplampen	Winterpakket*	
		DAB radio ontvangst	
		Diefstalalarm	
		App-Connect*	
	Voorruit, verwarmbaar/warmtewerend		
	Bestuurdersassistentiepakket Plus		
	Metallic lak		
	Keyless access		
	Lederen bekleding (Nappa Eco)		
Cons. adviesprijs inclusief opties en incl. btw en BPM	€ 34.795	€ 45.338	€ 80.935
Cons. adviesprijs inclusief opties en excl. btw en BPM	€ 25.125	€ 36.787	€ 66.107

Aanschafprijzen o.b.v. situatie medio 2019, aanschaf juli 2019. Prijslijst jan'19 voor Golf (Volkswagen, 2019a) en e-Golf (Volkswagen, 2019) en feb'19 voor Mirai (Toyota, 2019).

* Stoelverwarming inbegrepen bij Winterpakket. App-connect behelst onder andere smartphone integratie.

Bij de vergelijking dient aangetekend te worden dat, door de komst van een nieuw model Golf (VIII) in 2020, de gekozen benzine variant eind 2019 niet meer leverbaar is. In het geval van de e-Golf geldt momenteel, tot de komst van de nieuwe Golf, dat er een tijdelijk actiemodel leverbaar is met een betere uitrusting tegen een lagere prijs. De e-Golf krijgt

geen opvolger door de komst van een nieuw elektrisch model, de Volkswagen ID.3. Om toch een realistische vergelijking te krijgen is gekozen voor versies die gedurende een langer deel van de levenscyclus van het model (Golf VII) beschikbaar waren. We rekenen dus met de ‘normale’ prijs en niet de actieprij. Verder geldt dat kleine aanpassingen in de BPM per januari 2020 de aanschafprijs licht doen stijgen. Het verschil is echter minimaal. Daarom rekenen we hier met de aanschafprijzen medio 2019.

2030

Het is aannemelijk dat met name de aanschafkosten van batterij-elektrische voertuigen en voertuigen (met een brandstofcel) op waterstof in de toekomst dalen. Doorontwikkeling van batterijen resulteert in een hogere energiedichtheid. Dit in combinatie met opschaling van productie leidt tot lagere kosten van batterijen. Ook brandstofcellen moeten goedkoper worden door productie op grotere schaal.

Elektrische auto

Voor de **elektrische** auto maken we gebruik van het COSTREAM-model van CE Delft en schattingen omtrent het verloop van batterijprijzen een berekening van de verwachte aanschafprijs van een elektrische auto in 2030. De verwachting is dat de gemiddelde batterijprijs zal dalen van € 158/kWh in 2018 tot € 56/kWh in 2030 (BNEF, 2019). Dat betekent dat de e-Golf in zou kunnen profiteren van een forse prijsdaling. Kijken we echter naar de huidige trend in de markt en wensen van consumenten dan zal de gemiddelde batterijcapaciteit van een elektrische auto in het ‘Golf’ segment (C-segment) stijgen. Daarom gaan we in 2030 uit van een verdubbeling van de batterijcapaciteit. Voor de 2030 aanschafprijs van een elektrische auto in het C-segment wordt daarom gerekend met een batterij met een capaciteit van 71,6 kWh.

Met COSTREAM is tevens een inschatting gemaakt van het verloop van de aanschafprijs van een **benzineauto**. Daarbij wordt rekening gehouden met toenemende kosten voor het reduceren van emissies (NO_x-uitstoot, CO₂-uitstoot). Dit resulteert in extra ontwikkelingskosten en daarmee een hogere kostprijs van de auto.

Om de ontwikkeling van de prijs van een waterstofauto in te schatten is gebruik gemaakt van informatie van de U.S. Department of Energy op het gebied van waterstof en brandstofcellen. Op deze informatie baseren we de schatting dat de kosten van de brandstofcel nu zo’n € 165/kWh bedragen voor de Toyota Mirai. De Mirai heeft een brandstofcel die goed is voor een vermogen van 114 kWh bruto en 88,5 kWh netto. De totale kosten van de auto inclusief overhead en winstmarge schat men op US \$ 56.965 oftewel € 51.269 (USA Department of Energy, 2009). De verwachting van is dat de kosten van de brandstofcel sterk kunnen dalen naarmate de productiecapaciteit stijgt. Wel moet rekening gehouden worden met het streven naar een langere levensduur van de brandstofcel. Overall ziet men US \$ 75 oftewel € 67,50 per kWh netto als toekomstige gemiddelde kostprijs voor brandstofcellen (Papageorgopoulos, 2019).

Tabel 23 - Verwachte aanschafprijzen in 2030 van benzine, elektrisch en waterstof

	Cons. adviesprijs inclusief opties en excl. btw en BPM	Cons. adviesprijs inclusief opties en incl. btw en BPM
Benzineauto 2030 (gebaseerd op VW Golf 1.0 TSI 85 kW DSG Comfortline Business)	€ 25.757	€ 34.956
Elektrische auto 2030 (gebaseerd op VW e-Golf met verdubbeling batterijcapaciteit)	€ 29.669	€ 36.336
Waterstofauto 2030 (Gebaseerd op Toyota Mirai)	€ 31.261	€ 38.261

Voor 2030 is gebruik gemaakt van CE Delft COSTREAM-berekeningen voor benzine en elektrisch. Bij de berekening voor de elektrische auto worden schattingen voor batterijprijzen van (BNEF, 2019) gehanteerd. Voor de waterstofauto wordt uitgegaan van informatie en ramingen van de (USA Department of Energy, 2018) (USA Department of Energy, 2009) (Papageorgopoulos, 2019). Tevens is rekening gehouden met een vaste BPM-voet voor emissieloze auto's vanaf 2025 zoals in het Klimaatakkoord beschreven.

B.3.2 Variabele en vaste kosten

Naast de aanschafprijs is het van belang om de totale gebruiks- en bezitskosten van een auto mee te nemen om een goede afweging tussen de verschillende opties te kunnen maken. Daarom maken we een total cost of ownership (TCO) berekening met daarin de volgende vaste en variabele kosten:

- afschrijving: het waardeverlies van de auto tijdens de gebruiksperiode;
- verzekeringen: kosten van een Wettelijke Aansprakelijkheid- (WA) en Cascoverzekering;
- MRB: Motorrijtuigenbelasting;
- ROB: reparatie, onderhoud en banden;
- energie: kosten van benzine-, elektriciteit- of waterstofgebruik;
- overig: kosten van algemeen carrosserie-onderhoud (wasbeurt, etc.) en kosten van eigen laadinfrastructuur bij een elektrische auto.

2020

Voor 2020 gaan we uit van de volgende gegevens:

- Kosten afschrijving, verzekeringen, ROB: voor de benzineauto en elektrische auto (ANWB, 2019), en voor de Toyota Mirai (Autoweek, 2019).
- MRB: actuele tarieven Zuid-Holland
- Energie: Brandstofverbruik benzine o.b.v. (ANWB, 2019) € 1,70/liter. Elektriciteit voor elektrische auto o.b.v. CE Delft COSTREAM. Verbruik waterstof o.b.v. (ANWB, 2019) 1 kg/100 km en prijs € 10/kg.
- Overig: bevat bij de elektrische auto afschrijvingskosten van de eigen laadinfrastructuur o.b.v. CE Delft COSTREAM.

2030

Door de veranderingen in aanschafprijzen in 2030 wijzigt ook de TCO. De prijsdaling voor elektrisch zorgt voor lagere afschrijvingskosten. Bovendien is het waarschijnlijk dat restwaarden van gebruikte elektrische auto's in de loop der tijd stijgen, naarmate de acceptatie van elektrisch rijden toeneemt (ING, 2019). Daarom is het afschrijvingspercentage voor de TCO in 2030 verlaagd. Daarentegen stijgt de afschrijving voor

benzineauto's. Zij zullen naar verwachting dalen in populariteit (ook tweedehands) naarmate elektrisch rijden meer geaccepteerd raakt. Voor waterstofauto's geldt eveneens dat voor 2030 met een lager afschrijvingspercentage wordt gerekend. Een gebruikte markt zal zich langzaam ontwikkelen naarmate het aantal modellen op waterstof stijgt en het aantal tankstations toeneemt.

De verzekeringspremie blijft gelijk voor benzine en elektrisch aan de kosten in 2020. Bij waterstof daalt de verzekeringspremie door een flinke daling van de aanschafprijs. De kosten zijn ingeschat door CE Delft.

De MRB stijgt voor elektrisch en waterstof, aangezien deze volgens het Klimaatakkoord in 2030 ook voor nulmissieauto's moet worden afgerekend. We gaan hierbij uit van MRB op basis van de huidige benzinetarieven. We gaan uit van dezelfde ROB-kosten.

Voor de berekening van energiekosten gaan we uit van gelijkblijvende waarden. Er wordt echter wel uitgegaan van een hogere benzineprijs en een lagere waterstofprijs. Het is lastig een prijs aan de pomp te ramen voor waterstof. Dat hangt onder meer samen met de wijze van productie (grijs of groen) en de schaal waarop geproduceerd kan worden in 2030. Op basis van diverse bronnen (USA Department of Energy, 2018; IEA, 2019; FD, 2019) hanteren we voor 2030 een prijs van € 7 per kg.

Verder wordt een lichte verlaging van de kosten van (eigen) laadinfra meegerekend op basis van CE Delft COSTREAM.