



Van Mourik Broekmanweg 6  
2628 XE Delft  
Postbus 49  
2600 AA Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 30 00  
F +31 88 866 30 10

## **TNO-rapport**

### **TNO 2014 R10665**

Indirecte en directe CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektrische personenauto's

Datum	14 juli 2014
Auteur(s)	R. van Gijlswijk (TNO) G. Koornneef (TNO) H. van Essen (CE Delft) S. Aarnink (CE Delft)
Exemplaarnummer	2014-TM-RAP-0100006894
Aantal pagina's	24 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Milieu
Projectnaam	MaVe 2014
Projectnummer	060.08195/01.01.03

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2014 TNO

## Samenvatting

### Aanleiding

In 2011 zijn Kamervragen gesteld over de milieubelasting van elektrische auto's in het kader van de evaluatie van het beleid uit de autobrief I. De vragen betroffen vooral het feit dat autobelastingen zijn gebaseerd op de CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van het *gebruik* van een voertuig, de *directe* emissies, en niet op de *indirecte* emissies als gevolg van de *productie en sloop* van het voertuig. Ook de *indirecte* emissies die worden uitgestoten bij de *productie van brandstoffen* en *opwekking van elektriciteit* blijft bij het vaststellen van de autobelastingen buiten beschouwing. De staatssecretaris van Financiën heeft toegezegd de Kamer te informeren over deze indirecte emissies. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) heeft daarom TNO en CE Delft opdracht gegeven de beschikbare informatie hierover te inventariseren en in een notitie aan de Tweede Kamer te presenteren.

### Doelstelling

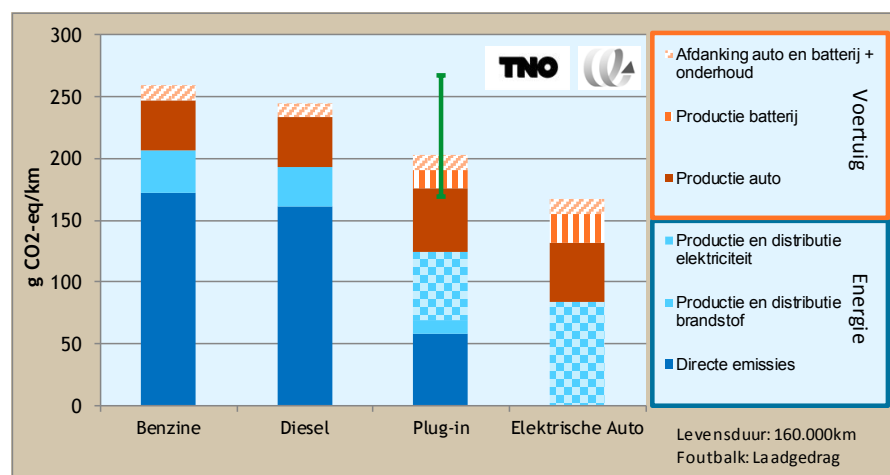
Deze notitie maakt op basis van bestaande literatuur een vergelijking tussen de uitstoot van broeikasgassen door conventionele auto's en door elektrische en semi-elektrische auto's. Het onderzoek vergelijkt de CO<sub>2</sub>-emissies van personenauto's *over de gehele voertuiglevenscyclus* en maakt het onderscheid tussen directe en indirecte emissies inzichtelijk. Met deze informatie zijn vervolgens conclusies getrokken over de CO<sub>2</sub>-uitstoot over de gehele levensduur van elektrische en semi-elektrische personenauto's - in vergelijking tot de CO<sub>2</sub>-emissies van conventionele personenauto's. Om te bepalen welke parameters van invloed zijn op de CO<sub>2</sub>-uitstoot is ook een gevoeligheidsanalyse onderdeel van de studie.

### Aannames

In het onderzoek is het *praktijk*verbruik van auto's vergeleken en is geen gebruik gemaakt van fabrieksopgaven. Daarnaast is uitgegaan van een gemiddeld gebruik van het voertuig en zijn de emissies uitgedrukt in gram CO<sub>2</sub> per kilometer.

### Conclusies

De resultaten van deze studie zijn samengevat in figuur 1.



Figuur 1 CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot per kilometer voor kleine middenklasse auto's bij gemiddeld gebruik.

Noot: de foutbalk geeft de variatie in het laadgedrag van plug-ins weer.

### *CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektrische auto's*

Over de hele levenscyclus resulteert het gebruik van een volledig elektrische auto in ca. 35% lagere CO<sub>2</sub>-emissies, in vergelijking met een benzineauto. De relatief hogere emissies bij de productie van de elektrische auto en de batterij worden volledig gecompenseerd tijdens de gebruiksfase van de auto. De CO<sub>2</sub>-winst zal in de toekomst nog groter worden doordat het aandeel hernieuwbare bronnen bij de opwekking van elektriciteit steeds verder zal toenemen.

### *CO<sub>2</sub>-uitstoot van semi-elektrische auto's*

Voor semi-elektrische auto's<sup>1</sup> is het aandeel elektrische kilometers van grote invloed op de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit aandeel is onder meer afhankelijk van de grootte van de batterij, het kilometrage en het laadgedrag. Vooral het laadgedrag is een onzekere factor die enorm verschilt tussen berijders. In deze studie zijn daarom drie 'laadscenario's' gebruikt, variërend van bijna niet laden tot twee keer per dag laden.

Uit de LCA-analyse voor semi-elektrische auto's blijkt dat ook deze auto's in de meeste gevallen een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot kennen dan conventionele auto's. De CO<sub>2</sub>-winst kan oplopen tot ca. 35% (vergelijkbaar met de volledig elektrische auto) wanneer een semi-elektrische auto twee keer per dag wordt geladen. Wordt een semi-elektrische auto echter weinig opgeladen, dan zorgen de relatief hoge CO<sub>2</sub>-emissies tijdens het productieproces zelfs voor iets hogere CO<sub>2</sub>-emissies over de hele levenscyclus in vergelijking tot een benzineauto (ca. +3%).

### *Gevoeligheidsanalyse*

- 1 Het totaal aantal gedurende de levensduur van de auto verreden kilometers is van grote invloed is op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot per kilometer en heeft, afhankelijk van het type auto, een tegengesteld effect. In het algemeen resulteert een groter aantal verreden kilometers namelijk in lagere CO<sub>2</sub>-emissies per km doordat de emissies van productie, onderhoud en afdanking verdeeld worden over een groter aantal kilometers. Bij semi-elektrische auto's leidt een hoog kilometrage echter ook tot hogere *directe* CO<sub>2</sub>-emissies doordat het aandeel elektrische kilometers in de meeste gevallen afneemt.
- 2 De CO<sub>2</sub>-winst van elektrische en (semi-)elektrische auto's neemt toe wanneer deze veel gebruikt worden in de stad. Door het terugwinnen van remenergie wordt dit type auto zuiniger; conventionele auto's worden onder deze omstandigheden juist minder zuinig.
- 3 Naar verwachting zullen de CO<sub>2</sub>-emissies bij de productie van voertuigen met een elektrische aandrijflijn in de toekomst dalen door schaalvergroting in de productie.
- 4 Ten slotte is de CO<sub>2</sub>-winst van (semi-)elektrische auto's sterk afhankelijk van de elektriciteitsmix. Wanneer niet wordt uitgegaan van de huidige elektriciteitsmix maar van kolenstroom of grotendeels groene stroom varieert de CO<sub>2</sub>-winst van een elektrische auto tussen de 3% (kolenstroom) en 54% (groot aandeel groene stroom). De impact voor een semi-elektrische auto die veel geladen wordt, is vergelijkbaar. Voor een semi-elektrische auto die vrijwel niet geladen wordt is de impact van de elektriciteitsmix vanzelfsprekend veel kleiner

---

<sup>1</sup> Semi-elektrische auto's worden vaak aangeduid als *plug-in hybrides* of kortweg *plug-ins*.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Bronnen voor directe en indirecte CO<sub>2</sub>-emissies van personenauto's .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Aannames voor het vergelijken van elektrische, semi-elektrische en conventionele personenauto's.....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Resultaten: CO<sub>2</sub>-emissies van elektrische, semi-elektrische en conventionele personenauto's over de gehele levenscyclus .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Gevoeligheidsanalyse .....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Openstaande vragen .....</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>18</b>
<b>8</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>20</b>
<b>9</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>22</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Literatuuronderzoek productie, onderhoud en afdanken	

# 1 Inleiding

In 2011 zijn Kamervragen gesteld over de milieubelasting van elektrische auto's in het kader van de evaluatie van het beleid uit de autobrief I. De vragen betroffen vooral het feit dat autobelastingen zijn gebaseerd op de CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van het *gebruik* van een voertuig, de *directe* emissies, en niet op de CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van de *productie en sloop* van het voertuig. Ook blijft de CO<sub>2</sub> die wordt uitgestoten bij de productie van brandstoffen en elektriciteit bij het vaststellen van de autobelastingen buiten beschouwing. CO<sub>2</sub>-emissies als gevolg van de productie en sloop van het voertuig en de productie van brandstoffen en elektriciteit worden aangeduid als *indirecte emissies*.

De staatssecretaris van Financiën heeft toegezegd de Kamer te informeren over deze indirecte emissies. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) heeft daarom TNO en CE Delft opdracht gegeven de beschikbare informatie hierover te inventariseren en in een notitie aan de Tweede Kamer te presenteren.

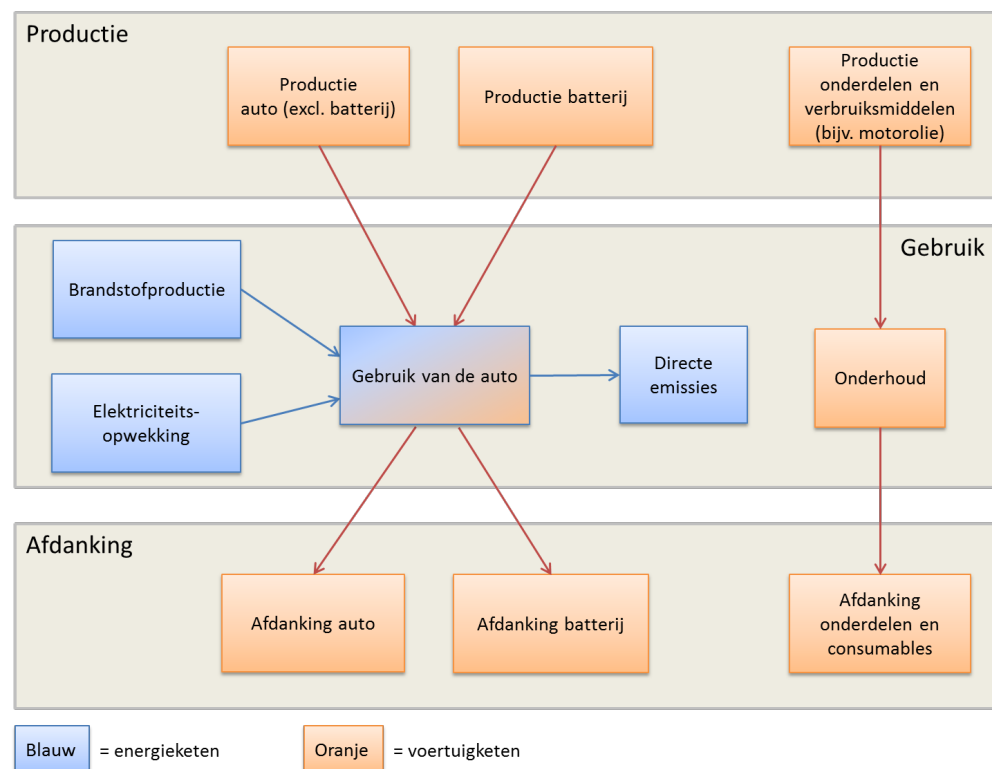
Deze notitie maakt op basis van bestaande literatuur een vergelijking tussen de uitstoot van broeikasgassen door conventionele auto's en de uitstoot van broeikasgassen door elektrische en semi-elektrische auto's. Het onderzoek is een *Life Cycle Analysis (LCA)* van CO<sub>2</sub>-uitstoot van personenauto's: het vergelijkt de CO<sub>2</sub>-emissies van voertuigen *over de gehele voertuiglevenscyclus* en maakt het onderscheid tussen directe en indirecte emissies inzichtelijk. Bij het onderzoek is uitgegaan van een gemiddeld gebruik van het voertuig, waarbij is uitgegaan van het gebruik en de levensduur van een elektrische auto. De emissies worden uitgedrukt in gram CO<sub>2</sub> per kilometer. Om te bepalen welke parameters van invloed zijn op de LCA-CO<sub>2</sub>-uitstoot van personenauto's is ook een gevoeligheidsanalyse onderdeel van de studie.

Hoofdstukken 2 en 3 geven achtereenvolgens inzicht in relevante directe en indirecte emissies en in de aannames voor de auto's die met elkaar zijn vergeleken. De resultaten worden gepresenteerd in hoofdstuk 4, waarna in hoofdstuk 5 via de gevoeligheidsanalyse inzicht wordt gegeven in de factoren die van invloed zijn op de verschillen in de uitstoot tussen conventionele, elektrische en (semi-)elektrische auto's. Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van openstaande vragen en aanbevelingen.

## 2 Bronnen voor directe en indirecte CO<sub>2</sub>-emissies van personenauto's

Cijfers over de CO<sub>2</sub>-uitstoot van personenauto's gaan meestal alleen over de directe uitstoot van CO<sub>2</sub> uit de uitlaat. Er komt echter ook CO<sub>2</sub> vrij bij de productie van brandstoffen en opwekking van de elektriciteit waarop gereden wordt. Daarnaast komen CO<sub>2</sub>-emissies vrij bij de productie, het onderhoud en de afdanking van voertuigen.

Dit onderzoek beschouwt daarom niet alleen de directe CO<sub>2</sub> uit de uitlaat, maar alle CO<sub>2</sub>-emissies die vrijkomen gedurende de hele levenscyclus van energie en van de auto, zoals weergegeven in figuur 2. In het onderzoek is het *praktijk*verbruik van auto's vergeleken, en niet het gemeten verbruik in de testcyclus.



Figuur 2 Bronnen voor directe en indirecte CO<sub>2</sub>-emissies over de gehele levenscyclus van een personenauto.

De eerste keten is de “energieketen” (blauw in de figuur), bestaande uit de productie en het gebruik van benzine/diesel en de opwekking van elektriciteit. Hieronder vallen ook de emissies die vrijkomen bij het winnen en transporteren van aardolie of aardgas, bij de productie van benzine en diesel in raffinaderijen, bij de opwekking van elektriciteit, en bij het gebruik van het voertuig: de emissies uit de uitlaat. De bijdrage van gebouwen en machines in de keten is gezien de schaalgrootte verwaarloosbaar.

De tweede keten is de “voertuigketen” (oranje in de figuur). Deze bestaat uit het produceren van de personenauto, inclusief het winnen van de benodigde grondstoffen zoals bijvoorbeeld ijzer, het onderhoud, inclusief het maken en afdanken van onderdelen, motorolie en andere ‘consumables’ en het afdanken van de auto. Voor elektrische en (semi-)elektrische auto’s is in deze keten de batterij apart belicht, omdat productie en afdanking van de batterij een belangrijke rol spelen. In bijlage A is meer informatie te vinden over de resultaten van de literatuuranalyse over de uitstoot bij voertuigproductie van zowel (semi-)elektrische auto’s als benzine- en dieselauto’s.

De totale uitstoot van broeikasgassen wordt uitgedrukt in zogenaamde CO<sub>2</sub>-equivalenten per kilometer. Dit betekent dat ook andere broeikasgassen dan CO<sub>2</sub> (zoals methaan) worden meegenomen.

### 3 Aannames voor het vergelijken van elektrische, semi-elektrische en conventionele personenauto's

In het onderzoek zijn een volledig elektrische auto en een plug-in hybride elektrische auto vergeleken met een conventionele benzine- en dieselauto. Aangezien er ontelbaar veel conventionele autotypen op de markt zijn, is in dit rapport in eerste instantie uitgegaan van een gemiddelde grootteklasse (C-segment of kleine middenklasse) die veel verkocht wordt in Nederland. In tabel 1 zijn de belangrijkste eigenschappen van de vergeleken auto's samengevat.

Tabel 1 Vergelijking auto's op benzine-, diesel-, plug-in hybride (benzine-) en volledig elektrische auto

	<b>Benzine</b>	<b>Diesel</b>	<b>Plug-in hybride</b>	<b>Elektrisch</b>
<i>Voorbeeld merk/type (2014) in deze klasse</i>	<i>VW Golf</i>	<i>VW Golf</i>	<i>Opel Ampera</i>	<i>Nissan Leaf</i>
Totaal gewicht	1225 kg	1365 kg	1715 kg	1474 kg
Gewicht batterij	n.v.t.	n.v.t.	180 kg	274 kg
Bereik op elektriciteit volgens opgave fabrikant***	n.v.t.	n.v.t.	ca. 60 km	ca. 175 km
Levensduur (aanne*)	160.000 km	160.000 km	160.000 km	160.000 km
Percentage km elektrisch	n.v.t.	n.v.t.	10-95% (65%)**	100%
CO <sub>2</sub> -uitstoot volgens de Europese typegoedkeuring (combinatie van op de brandstofmotor en elektrisch)	118 g/km	106 g/km	27 g/km	0 g/km
CO <sub>2</sub> -uitstoot in de praktijk bij rijden op de brandstofmotor	173 g/km	161 g/km	166 g/km	n.v.t.
Elektriciteitsverbruik in de praktijk bij rijden op de elektromotor	n.v.t.	n.v.t.	0,18 kWh/km	0,18 kWh/km
Wegtype (stad, buiten- of snelweg)*	Nederlandse gemiddelde	Nederlandse gemiddelde	Nederlandse gemiddelde	Nederlandse gemiddelde

\*) Zie hieronder voor een toelichting op deze aanname.

\*\*) Zie tekstbox 1 voor een toelichting op dit percentage.

\*\*\*) In de praktijk zal het bereik lager zijn, bijvoorbeeld door het gebruik van in-car apparatuur of door weersomstandigheden. In deze studie is gerekend met een gemiddelde van 40 km per rit voor plug-ins (zie tekstbox 1)

Om op een eerlijke wijze de vergelijking tussen conventionele en (semi-)elektrische auto's te kunnen maken, is het kilometrage (de levensduur) en het aandeel van verschillende wegtypen (snelweg, stad, buitenweg) gelijk gesteld voor alle autotypen.

Het totale kilometrage over de hele levensduur verschilt in de praktijk sterk per auto en hangt o.a. af van het gebruikspatroon en de technische en economische levensduur van het voertuig. Het gemiddelde voor alle auto's in Nederland ligt rond de 220.000 km (gebaseerd op cijfers van het CBS en VWE, bewerkt door CE Delft en TNO). Omdat elektrische auto's pas enkele jaren op de markt zijn, zijn er voor



deze auto's nog geen gegevens beschikbaar over het kilometrage over de hele levensduur.

Door de beperkte actieradius en de afname van de batterijcapaciteit bij vaak laden en ontladen ligt het kilometrage over de hele levensduur van volledig elektrische auto's mogelijk iets onder het bovengenoemde gemiddelde voor alle auto's. De fabrikanten van elektrische auto's geven momenteel garantie op hele elektrische aandrijflijn van minimaal 100.000 km. Hierin is uiteraard al rekening gehouden met een behoorlijke veiligheidsmarge, dus de technische levensduur zal hoger liggen. De ervaringen met gewone hybrides, die al veel langer op de markt zijn, laten zien dat de kilometrages volgens de garantieregeling van de fabrikanten (160.000 km bij de meeste hybrides) zeer ruim overschreden kunnen worden.

Tegenover de beperkende invloed van actieradius en batterijveroudering staat dat de hogere aanschafprijs in combinatie met de lagere gebruikskosten het juist aantrekkelijk maken om elektrische auto's relatief intensief te gebruiken. De verwachting is echter dat voor volledig elektrische auto's het eerste effect (de technische beperkingen) voornamelijk dominant is. In deze studie is het gebruik van een elektrisch voertuig als uitgangspunt genomen en gekozen voor een gemiddelde van 160.000 km. Dit komt overeen met een levensduur van 10 jaar en 16.000 km per jaar of 16 jaar en 10.000 km per jaar. Dit kan worden beschouwd als een conservatieve inschatting.

Voor de aandelen van de verschillende wegtypes is het gemiddelde van de gehele Nederlandse vloot aangehouden. In de gevoeligheidsanalyse van hoofdstuk 5 is het gebruikspatroon gevarieerd. Dit geldt voor zowel het totale kilometrage als voor de aandelen van de wegtypes.

In de CO<sub>2</sub>-emissies bij de productie van volledig elektrische voertuigen neemt de batterij bijna de helft in. Hierover is veel gepubliceerd. Toch is er weinig consensus: er is een grote variatie in cijfers. Deze variatie komt met name door verschillen in de samenstelling van de electrodes in batterijen die in voertuigen worden gebruikt, en door verschillen in de energievraag van de productie. Deze energievraag hangt mede af van de schaalgrootte van de productie. Bij grote batterijen schalen de CO<sub>2</sub>-emissies met capaciteit en massa. Bij plug-in hybrides met relatief kleine batterijen is de CO<sub>2</sub>-emissie relatief hoog, doordat koeltechniek en elektronica een relatief groot aandeel innemen.

Het afdanken en onderhoud van het voertuig hebben een beperkte invloed op de totale CO<sub>2</sub>-emissie. Binnen deze categorie is het aandeel van het afdanken klein t.o.v. het onderhoud, waardoor het afdanken bijna verwaarloosbaar is. Dit komt omdat het vooral staal is dat wordt gerecycled en dit wordt meegenomen in de vermeden emissies bij de productie van het voertuig. Dit geldt ook voor het afdanken van de batterij en zorgt dus niet voor een hogere CO<sub>2</sub>-emissie dan bij conventionele voertuigen. Dit komt omdat de batterijen hergebruikt of gerecycled zullen worden na de gebruiksfase in het voertuig. Wel moet aangegeven worden dat recycling niet alleen CO<sub>2</sub> effecten heeft, maar ook andere milieueffecten. Deze andere effecten zijn niet zichtbaar als er naar CO<sub>2</sub>-emissie gekeken wordt.

In bijlage A zijn de resultaten van het literatuuronderzoek naar CO<sub>2</sub> emissies tijdens met name productie, onderhoud en afdanken kort besproken.

**Tekstbox 1** Percentage elektrische kilometers bij een plug-in hybride auto.

Een semi-elektrische auto of plug-in kan zowel op benzine (of op diesel) als op elektriciteit rijden. Omdat een elektrische kilometer over de hele energieketen minder CO<sub>2</sub>-uitstoot veroorzaakt dan een kilometer op benzine, heeft het aangenomen percentage elektrische kilometers een grote invloed op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van dit autotype. Dit aandeel hangt af van het kilometrage (hoe meer kilometers, hoe lager het aandeel van elektrische kilometers in het totaal) en van het laadgedrag (hoe vaker de plug-in wordt opgeladen, hoe hoger het aandeel elektrisch). Het aangenomen kilometrage is voor alle autotypen gelijk gesteld op 160.000 km.

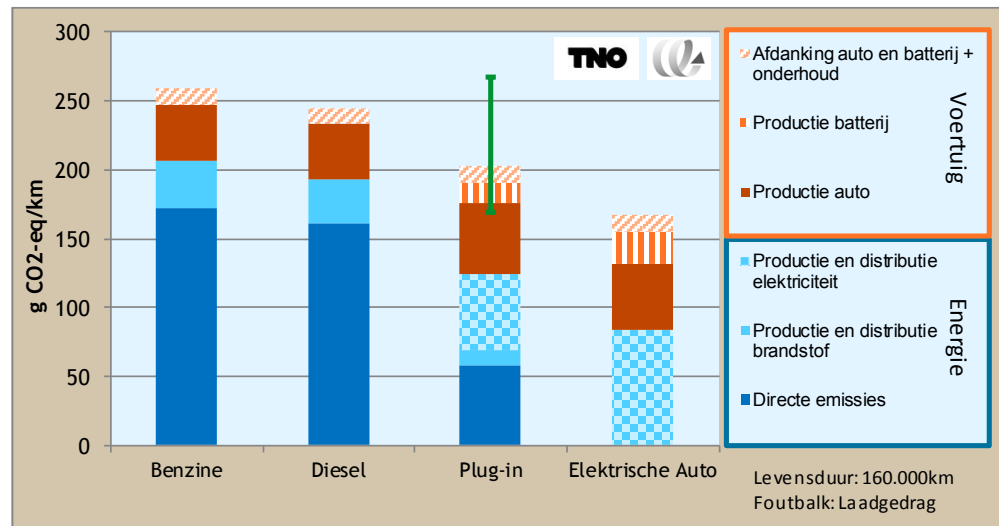
Het aantal elektrische kilometers per jaar hangt hoofdzakelijk af van het elektrische bereik per volle batterij (zie tabel 1) en het aantal keer dat de plug-in wordt opgeladen. Over dit laatste aspect is echter nog weinig bekend. Gezien de onzekerheden in deze cruciale factor is in deze studie gerekend met een bandbreedte, waarbij gevarieerd wordt tussen weinig laden (10% elektrische kilometers) en veel (2 keer per dag) laden. De middenwaarde is berekend met 1 keer per dag laden, waarbij is aangenomen dat de batterij niet altijd volledig wordt leeg gereden. Met 200 rijdagen per jaar komt de middenwaarde van een plug-in op ca. 65%. Bij twee keer laden per dag (best case) neemt dit percentage toe naar 95%.

Deze percentages zijn hoger dan de schattingen van Ligterink en Smokers (2013) omdat daarin is gekeken naar het zakelijk gebruik van dit autotype (met een hoog jaarkilometrage en daardoor een relatief laag percentage elektrische kilometers). In dit rapport worden resultaten gepresenteerd voor de gehele gebruiksperiode, en wordt dus ook het percentage elektrisch tijdens particulier gebruik (met een veel lager jaarkilometrage en hoger aandeel elektrisch) meegenomen.

## 4 Resultaten: CO<sub>2</sub>-emissies van elektrische, semi-elektrische en conventionele personenauto's over de gehele levenscyclus

In figuur 2 zijn de totale CO<sub>2</sub>-emissies van de verschillende autotypen met elkaar vergeleken in grammen CO<sub>2</sub>-equivalenten per kilometer. In de figuur is onderscheid gemaakt tussen de voertuigketen (in oranje) en de energieketen (in blauw). Binnen deze categorieën is onderscheid gemaakt naar de factoren met de grootste invloed op de totale CO<sub>2</sub>-emissies.

Zoals in het vorige hoofdstuk werd toegelicht, hangt de CO<sub>2</sub>-uitstoot van plug-in hybride sterk af van het laadgedrag van de berijder. De bandbreedte in de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van deze onzekerheid in het laadgedrag is daarom met een groene balk aangegeven in de figuur.



Figuur 3 CO<sub>2</sub>-equivalente uitstoot per kilometer voor kleine middenklasse auto's bij gemiddeld gebruik.

Noot: De bandbreedte bij de plug-in hybride geeft de onzekerheid in het laadgedrag weer met als ondergrens veel laden (2 keer per dag; 95% van de kilometers elektrisch) en als bovengrens weinig laden (10% van de kilometers elektrisch). Voor de elektriciteitsopwekking is gerekend met 467 g/kWh, zie verder hoofdstuk 5.

Figuur 3 laat zien dat een volledig elektrische auto per gereden kilometer tot ca. 35% lagere CO<sub>2</sub>-emissies heeft over de gehele levensduur dan een gemiddelde benzineauto. Dit is het resultaat van de aanzienlijk lagere emissies in de energieketen. Terwijl bij een conventionele auto deze energieketen verantwoordelijk is voor ca. 80% van de totale emissies, is dit bij een volledig elektrische auto grofweg de helft (ca. 50%). De CO<sub>2</sub>-winst die volledig elektrische auto's behalen in de energieketen compenseert ruimschoots voor de relatief grotere hoeveelheid emissies die vrijkomen in de voertuigketen. De emissies in de voertuigketen (productie, onderhoud en afdanking) liggen hoger dan bij een vergelijkbare conventionele auto. Dit komt enerzijds door de additionele emissies die vrijkomen

bij de productie van de batterij en anderzijds door de hogere emissies bij de productie van het voertuig zelf. Dit laatstgenoemde verschil wordt veroorzaakt door het gebruik van lichtgewicht materialen en door de productie van de relatief nieuwe elektrische aandrijflijn. De vermeden emissies door het gebruik van gerecyclede materialen zijn meegeteld bij de productie van het voertuig en de batterij.

Vanzelfsprekend is de relatieve CO<sub>2</sub>-winst van een plug-in hybride t.o.v. een conventionele auto lager dan het geval is voor de volledig elektrische auto. Dit autotype rijdt immers ook op benzine, wat leidt tot hogere emissies dan bij het rijden op elektriciteit. Wanneer de plug-in één keer per dag geladen wordt is deze winst grofweg 20% (in vergelijking met een benzineauto).

De onzekerheid in deze schatting is groot door de significante invloed van het aangenomen aandeel elektrisch (zie tekstbox 1 in Hoofdstuk 3). Wanneer de berijder twee keer per dag oplaadt, hebben plug-ins 35% lagere emissies over de gehele keten. Echter, als een plug-in hybride weinig wordt opgeladen en dus vrijwel uitsluitend op benzine wordt gereden, kunnen de emissies zelfs hoger uitvallen dan bij een conventionele auto (ca. +3%). Net als voor volledig elektrische auto's zijn de emissies in de voertuigketen hoger dan het geval is bij conventionele auto's. Ook voor dit autotype geldt dat de productie van de complexe aandrijflijn en van de batterij deze relatief hogere emissies veroorzaakt. Bij één keer laden per dag of twee keer laden per dag wordt deze hogere CO<sub>2</sub>-emissie in de voertuigketen meer dan gecompenseerd door de lagere emissies in de energieketen.

Ten slotte laat figuur 3 zien dat de emissies in de voertuigketen maximaal 1/5e tot 1/2e van de totale emissies over de levenscyclus bedragen. Binnen deze keten heeft de afdanking en het onderhoud van een auto slechts een beperkte invloed op de totale CO<sub>2</sub>-emissie. Dit geldt voor zowel de conventionele auto's als voor de (semi-)elektrische auto's. Binnen deze subcategorie is het aandeel van afdanking van het voertuig en van de batterij verwaarloosbaar doordat de onderdelen grotendeels worden gerecycled. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat niet gekeken is naar andere milieueffecten die eventueel kunnen optreden (bijv. toxiciteit bij de grondstofwinning).

Tot slot merken we op dat zowel conventionele auto's als (semi-)elektrische auto's komende jaren verder zullen worden ontwikkeld en daardoor waarschijnlijk nog een stuk energiezuiniger worden. Door ontwikkelingen in de voertuig- en batterijproductie kan ook de uitstoot daarvan gaan veranderen. Het is op dit moment niet te voorspellen of het verschil tussen de conventionele auto's en (semi)elektrische auto's hierdoor zal toe- of afnemen.

## 5 Gevoeligheidsanalyse

In het vorige hoofdstuk zijn de verschillende autotypen vergeleken op basis van Nederlandse gemiddeldes in levensduur, wegtypen, autogrootte, etc. De hierbij gehanteerde eigenschappen van de auto's en hun gebruik (zie tabel 1) hebben een grote invloed op het resultaat. Daarom wordt in dit hoofdstuk eenzelfde vergelijking gemaakt voor een aantal specifieke cases waarbij twee parameters worden gevarieerd: het gebruikspatroon van de auto en de uitstoot van elektriciteitsopwekking.

### *Aannames voor het gebruikspatroon*

Voor het gebruikspatroon onderscheiden we naast het gemiddelde (zie tabel 1) een grote zakelijke auto met een hoog kilometrage die vooral buiten de bebouwde kom wordt gereden en een kleine particuliere auto met een laag kilometrage die vooral binnen de bebouwde kom wordt gereden. De belangrijkste eigenschappen van de auto's die in beide cases zijn vergeleken, zijn samengevat in Tabel 2.

Tabel 2 Vergelijking auto's op brandstof, elektriciteit en beide (plug-in hybride) in twee cases.

	<b>Kleine particuliere auto in stad</b>	<b>Grote zakelijke auto buiten stad</b>
	Levensduur: 100.000km 60% stad, 20% buitenweg, 20% snelweg	Levensduur: 240.000km 10% stad, 30% buitenweg, 60% snelweg
Benzine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renault Clio</li> <li>• 1020 kg (voertuig)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VW Passat</li> <li>• 1486 kg (voertuig)</li> </ul>
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renault Clio</li> <li>• 1096 kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VW Passat</li> <li>• 1515 kg</li> </ul>
Plug-in hybride	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opel Ampera</li> <li>• 1715 (voertuig), 180 kg (batterij)</li> <li>• 10% - 95% elektrische kms*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opel Ampera</li> <li>• 1715 (voertuig), 180 kg (batterij)</li> <li>• 10% - 76% elektrische kms*</li> </ul>
Elektrisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nissan Leaf</li> <li>• 1474 kg (voertuig), 274 kg (batterij)</li> <li>• 100% elektrische kms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nissan Leaf</li> <li>• 1474 kg (voertuig), 274 kg (batterij)</li> <li>• 100% elektrische kms</li> </ul>

\* Zie tekst box 1 voor een toelichting op de berekening van het percentage elektrisch.

### *Aannames voor de elektriciteitsmix*

Naast een gevoeligheidsanalyse met andere aannames over de kenmerken van de vergeleken auto's en het gebruik, is ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de gehanteerde elektriciteitsmix. In de gemiddelde case is uitgegaan van de huidige handelsmix van Nederland die grotendeels opgewekt wordt met aardgas (63%) en in mindere mate met kolen (28%) (CE Delft, 2012). Deze handelsmix is gecorrigeerd voor het huidige aandeel duurzame elektriciteit (10%) en transportverliezen (15%). De totale uitstoot is daarmee 467 g/kWh.

De gemiddelde huidige elektriciteitsmix is niet noodzakelijk gelijk aan wat er daadwerkelijk in de (semi-)elektrische auto terecht komt. De elektriciteitsmix voor het opladen van een elektrische auto is immers sterk afhankelijk van het tijdstip en de locatie van opladen. Indien enkel hernieuwbare bronnen worden gebruikt is de uitstoot nihil, terwijl die bij kolenstroom aanmerkelijk hoger is dan het gemiddelde. Het is voor een gebruiker niet altijd duidelijk welke stroommix er wordt gebruikt bij

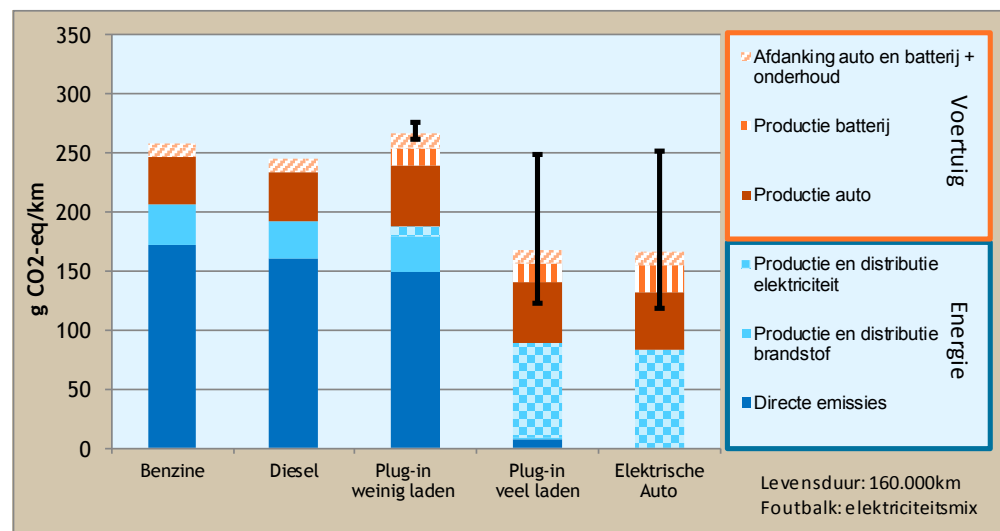
het laden. Daarnaast kunnen op macroniveau ook nog interacties optreden met andere sectoren, bijv. via het Europese emissiehandelssysteem.

In de gevoeligheidsanalyse is gerekend met twee alternatieve aannames: een hoog scenario met 100% kolenstroom (935 g/kWh) en een laag scenario met een elektriciteitsmix met een hoog aandeel hernieuwbare bronnen (200 g/kWh).

### Resultaten gevoeligheidsanalyse

De impact van de elektriciteitsmix op de gemiddelde case die in hoofdstuk 4 werd gepresenteerd is samengevat in Figuur 4. Figuur 5 CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot per kilometer voor kleine particuliere auto met veel ritten in de stad

Noot: De bandbreedte bij de (semi-)elektrische auto's geeft de variatie in elektriciteitsmix weer met als ondergrens een groot aandeel elektriciteit uit het hernieuwbare bronnen (200 g/kWh) en als bovengrens kolenstroom (935 g/kWh). Voor het gemiddelde is gerekend met 467 g/kWh.



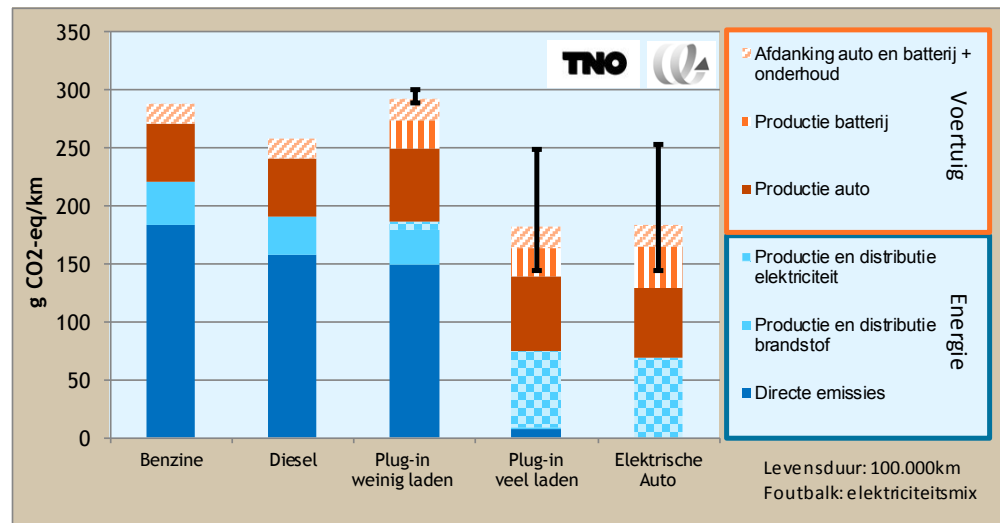
Figuur 4 CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot per kilometer voor gemiddelde auto met gemiddeld gebruik

Noot: De bandbreedte bij de (semi-)elektrische auto's geeft de variatie in elektriciteitsmix weer met als ondergrens een groot aandeel elektriciteit uit hernieuwbare bronnen (200 g/kWh) en als bovengrens kolenstroom (935 g/kWh). Voor het gemiddelde is gerekend met 467 g/kWh.

Zoals Figuur 4 laat zien is de impact van de gehanteerde elektriciteitsmix zeer beperkt bij een plug-in die weinig (10%) elektrisch rijdt en zeer groot bij een plug-in die twee keer per dag opgeladen wordt en dus veel elektrische kilometers rijdt (95% van de 160.000 kilometers). Dit laatste geldt vanzelfsprekend ook voor volledige elektrische personenauto's. De CO<sub>2</sub>-winst van een (semi-)elektrische auto t.o.v. een benzineauto varieert dan van ca. 3% wanneer op kolenstroom (935 g/kWh) wordt gereden tot ca. 54% bij een groot aandeel groene stroom (200g/kWh). Ter vergelijking, met de huidige mix (467 g/kWh) is deze winst ongeveer 35%.

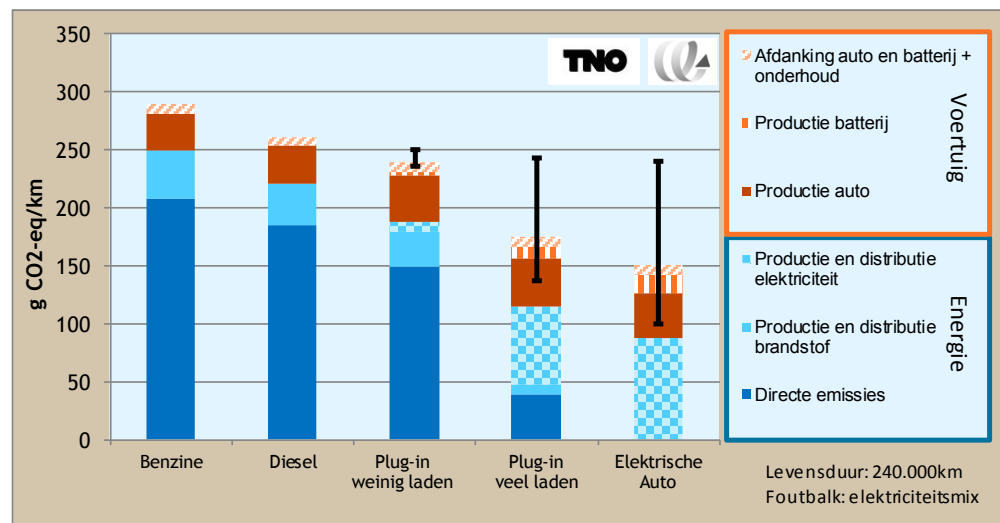
In Figuur 5 en Figuur 6 is naast de gevoeligheid van de elektriciteitsmix ook gevarieerd met de autokenmerken en het autogebruik. Figuur 5 bevat de vergelijking tussen kleine auto's met een laag kilometrage die veel in de stad rijden

en Figuur 6 laat de resultaten zien voor grote auto's met een hoog kilometrage die veel buiten de stad rijden.



Figuur 5 CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot per kilometer voor kleine particuliere auto met veel ritten in de stad

Noot: De bandbreedte bij de (semi-)elektrische auto's geeft de variatie in elektriciteitsmix weer met als ondergrens een groot aandeel elektriciteit uit het hernieuwbare bronnen (200 g/kWh) en als bovengrens kolenstroom (935 g/kWh). Voor het gemiddelde is gerekend met 467 g/kWh.



Figuur 6 CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot per kilometer voor grote zakelijke auto met veel ritten buiten de stad

Noot: De bandbreedte bij de (semi-)elektrische auto's geeft de variatie in elektriciteitsmix weer met als ondergrens een groot aandeel groene stroom (200 g/kWh) en als bovengrens kolenstroom (935 g/kWh). Voor het gemiddelde is gerekend met 467 g/kWh.

De gevoeligheidsanalyse toont aan dat ook bij de twee andere cases - waarin verschillende gebruikspatronen en conventionele autotypen zijn gebruikt - de (semi-) elektrische auto's vaak een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot over de levensduur hebben dan conventionele auto's. Een plug-in met een laag kilometrage die vrijwel niet geladen wordt vormt een uitzondering hierop, doordat - in tegenstelling tot de

andere cases - de relatief hoge emissies in de voertuigketen in dit geval niet gecompenseerd worden door lagere emissies in de energieketen. Daarnaast blijkt een aantal factoren van grote invloed op het resultaat.

Ten eerste blijkt dat de CO<sub>2</sub>-winst van (semi-)elektrische auto's *in de energieketen* groter is in de case waarbij deze auto's veel in de stad rijden dan wanneer ze met name op de snelweg rijden. Dit komt doordat (semi-) elektrische auto's, in tegenstelling tot conventionele auto's, juist zuiniger worden in de stad omdat dan veel remenergie kan worden teruggewonnen. Een (semi-)elektrische auto gebruikt in de stad grofweg 40% minder elektriciteit dan op de snelweg.

Ten tweede blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat het totaal aantal verreden kilometers twee tegengestelde effecten heeft op de uitstoot van auto's. Enerzijds geldt dat een hoger totaal aantal verreden kilometers leidt tot lagere emissies per kilometer, doordat de emissies die vrijkomen bij de productie en afdanking gedeeld worden over een groter aantal kilometers. Anderzijds blijkt dat een hoger totaal aantal verreden kilometers de CO<sub>2</sub>-uitstoot per kilometer van plug-in hybrides verhoogt, doordat minder kilometers elektrisch gereden kunnen worden en er dus meer directe emissies vrijkomen. Een vergelijking van Figuur 5 en Figuur 6 leert dat een plug-in die 2x per dag geladen wordt bij een laag kilometrage (100.000 kilometer) nog tot een vergelijkbare CO<sub>2</sub>-winst kan leiden als een volledig elektrische auto (doordat in dat geval ca. 95% van de kilometers elektrisch zijn). Wanneer 240.000 kilometer verreden wordt tijdens de levensduur leidt de plug-in tot een relatief lagere CO<sub>2</sub>-winst t.o.v. een benzineauto (40%) dan een volledig elektrische auto (48%), doordat de plug-in bij dit kilometrage ca. 75% van de kilometers elektrisch kan rijden bij twee keer laden.

Een derde opvallende bevinding is dat het laadgedrag een grotere invloed heeft op de CO<sub>2</sub>-uitstoot van plug-in hybrides bij een kleiner aantal totaal verreden kilometers dan bij een hoog kilometrage. Dit is ook logisch doordat in het eerste geval, het *potentiële* aandeel elektrisch hoger is. Dat wil zeggen, bij een lange levensduur zal sowieso een groot aandeel op benzine gereden moeten worden, zelfs als veel geladen wordt.

Ten slotte blijkt in beide specifieke cases, evenals hierboven werd aangetoond voor de gemiddelde case, de elektriciteitsmix van grote invloed op de CO<sub>2</sub>-winst van (semi-)elektrische auto's. Vanzelfsprekend geldt dat hoe groter het absolute aantal elektrische kilometers (bijv. door een hoog totaal kilometrage of door veel laden), hoe groter de impact van de gehanteerde elektriciteitsmix. Wanneer bijvoorbeeld 240.000 kilometer wordt verreden over de levensduur, varieert de relatieve CO<sub>2</sub>-winst t.o.v. een benzineauto tussen ca. 16% (kolenstroom, 935 g/kWh) tot ca. 53% (groot aandeel groene stroom, 200 g/kWh) voor een plug-in die twee keer per dag geladen wordt en tussen ca. 17% tot 65% voor een volledig elektrische auto.



## 6 Openstaande vragen

Tijdens deze ketenanalyse zijn een aantal onzekerheden naar voren gekomen.

Ten eerste is het *praktijkaandeel elektrische kilometers* bij plug-in hybrides onbekend. Zoals in tekstbox 1 al werd toegelicht zijn in dit rapport daarom geen puntschattingen gemaakt, maar zijn de resultaten van drie laadmogelijkheden (1x per dag, 2x per dag, weinig laden) weergegeven in een bandbreedte. Omdat deze factor van cruciale invloed is op de CO<sub>2</sub>-uitstoot van plug-in hybrides, is het van groot belang dat deze factor nader onderzocht wordt. Dit kan bijvoorbeeld door praktijkmonitoring. Hieraan gerelateerd is de les dat bij relatief veel elektrisch rijden met de plug-in (m.a.w. een laag jaarkilometrage i.c.m. veel laden) de plug-in aanzienlijke CO<sub>2</sub>-winst kan opleveren. Het is daarom belangrijk om manieren te ontwikkelen waarmee wordt gestimuleerd dat met plug-in hybrides veel elektrisch wordt gereden.

Ten tweede is het *verbruik van een (semi-)elektrische auto op verschillende wegtypen* nog erg onzeker. Hoewel in deze studie wel een eerste schatting wordt gedaan van de mate waarin een (semi-)elektrische auto zuiniger is in de stad dan op de snelweg, is dit nog niet gemeten in de praktijk. Ook dit aspect verdient een aanbeveling voor nader onderzoek.

Ten derde is bij de voertuig (en batterij) productie van (semi-)elektrische auto's geen rekening gehouden met *mogelijke toekomstige schaalvoordelen* die al wel in de resultaten van conventionele auto's zijn verwerkt. Naarmate er meer voertuigen met een elektrische aandrijflijn op de markt komen, zullen de grotere productieaantallen zorgen voor een efficiënter productieproces en dus voor lagere CO<sub>2</sub>-emissies per voertuig.

Ten vierde is er nog weinig consensus in de literatuur over de *emissies van de batterijproductie*: er bestaat een grote variatie in cijfers. Deze variatie komt met name door verschillen in de samenstelling van de elektroden in batterijen en door verschillen in de energievraag tijdens de productie. Deze energievraag hangt mede af van de grootte van de batterij. Grote batterijen hebben schaalvoordelen wat betreft de koeltechniek en elektronica, terwijl bij kleine batterijen deze schaalvoordelen in mindere mate optreden. Daarom zijn de CO<sub>2</sub>-emissies bij kleine batterijen relatief hoog.

Ten slotte is voor deze memo alleen gekeken naar verschillen in CO<sub>2</sub>-uitstoot, en dus niet naar *andere milieueffecten* (bijv. luchtvervuilende emissies, watergebruik, toxiciteit, etc.). Ook voor deze milieueffecten zullen verschillen optreden tussen autotypen. Zodoende zou het goed zijn om ook deze effecten te kwantificeren in vervolgonderzoek.

## 7 Conclusies

### *CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektrische auto's*

Over de hele levenscyclus resulteert het gebruik van een volledig elektrische auto in ca. 35% lagere CO<sub>2</sub>-emissies, in vergelijking met een benzineauto. De relatief hogere emissies bij de productie van de elektrische auto en de batterij worden volledig gecompenseerd tijdens de gebruiksfase van de auto. Deze CO<sub>2</sub>-winst zal in de toekomst nog groter worden doordat het aandeel hernieuwbare bronnen bij de opwekking van elektriciteit steeds verder zal toenemen.

### *CO<sub>2</sub>-uitstoot van semi-elektrische auto's*

Voor semi-elektrische auto's<sup>2</sup> is het aandeel elektrische kilometers van grote invloed op de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit aandeel is onder meer afhankelijk van de grootte van de batterij, het kilometrage en het laadgedrag. Over laadgedrag bestaat veel onduidelijkheid. In deze studie zijn daarom drie 'laadscenario's' gebruikt, variërend van bijna niet laden tot twee keer per dag laden.

Uit de LCA-analyse voor semi-elektrische auto's blijkt dat ook deze auto's in de meeste gevallen een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot kennen dan conventionele auto's. De CO<sub>2</sub>-winst kan oplopen tot ca. 35% (vergelijkbaar met een volledig elektrische auto) wanneer een semi-elektrische auto twee keer per dag wordt geladen. Wordt een semi-elektrische auto 1 keer per dag opgeladen, dan loopt de CO<sub>2</sub>-winst terug naar 22% en wordt deze auto weinig opgeladen, dan zorgen de relatief hoge CO<sub>2</sub>-emissies tijdens het productieproces zelfs voor iets hogere CO<sub>2</sub>-emissies over de hele levenscyclus in vergelijking tot een benzineauto (ca. +3%).

### *Gevoeligheidsanalyse*

1. Het totaal aantal tijdens de levensduur van de auto verreden kilometers is van grote invloed is op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot per kilometer en heeft, afhankelijk van het type auto, een tegengesteld effect. In het algemeen resulteert een groter aantal kilometers namelijk in lagere CO<sub>2</sub>-emissies per km doordat de emissies van productie, onderhoud en afdanking verdeeld worden over een groter aantal kilometers. Bij semi-elektrische auto's leidt een hoog kilometrage echter ook tot hogere CO<sub>2</sub>-emissies in de energieketen doordat het aandeel elektrische kilometers in de meeste gevallen afneemt, wat leidt tot hogere directe emissies.
2. De CO<sub>2</sub>-winst van elektrische en (semi-)elektrische auto's neemt toe wanneer deze veel gebruikt worden in de stad. Door het terugwinnen van remenergie wordt dit type auto zuiniger; conventionele auto's worden onder deze omstandigheden juist minder zuinig.
3. Naar verwachting zullen de CO<sub>2</sub>-emissies bij de productie van voertuigen met een elektrische aandrijflijn in de toekomst dalen door schaalvergroting in de productie.

---

<sup>2</sup> Semi-elektrische auto's worden vaak aangeduid als *plug-in hybrides* of kortweg *plug-ins*.

4. De elektriciteitsmix heeft een grote invloed op de emissies van plug-ins en volledig elektrische auto's. Voor semi-elektrische auto's wordt deze impact vanzelfsprekend groter naarmate de semi-elektrische auto vaker opgeladen wordt (groter aandeel elektrische kilometers). In dit geval varieert de CO<sub>2</sub>-winst t.o.v. een benzineauto van ca. 4% (kolenstroom, 935 g/kWh) tot ca. 54% (groot aandeel stroom uit hernieuwbare bronnen, 200 g/kWh). De cijfers voor een volledig elektrische auto zijn vergelijkbaar.

## 8 Referenties

AMT, Meerverbruik met airconditioning, 2002.  
<http://www.amt.nl/Techniek/Aandrijving/2002/7/Meerverbruik-met-airconditioning-2002-0708-AMT027006W>

Balthasar, Ma, H. F., Tait, N. Riera-Palou X., Harrison A., A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles, *Energy Policy* 44 (2012) 160-173, 2012.

Bles M., Wielders L., Achtergrondgegevens Stroometikettering 2012, CE Delft, 2012.

CBS Statline – Natuur en Milieu – Milieu – Emissies naar lucht – emissies naar lucht; wegverkeer 4 februari 2014. <http://statline.cbs.nl/statweb/dome/?LA=nl>

Ecoinvent database, version 2.2, S.I. : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

Ellingsen, L. et al., Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack, *Journal of Industrial Ecology*, 2013.

Gbegbaje-Das, E., Life Cycle CO<sub>2</sub>e Assessment of Low Carbon Cars 2020-2030, PE International, 2013.

Hawkins, T.R. et al., Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, *Journal of Industrial Ecology*, Volume 17, issue 1, pp. 53-64, February 2013.

Hawkins, T.R., Gausen O.M., Strømman A.H., Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review, *Int J Life Cycle Assess* 17:997-1014, 2012.

Helms, H., Pehnt M., Lambrecht U., Liebich A., Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions, IFEU, 18th Int. Symposium Transport and Air Pollution, 2010.

Hill N., Brannigan C., Wynn D., Milnes R., Essen H. van, Boer E. den, Grinsven A. van, Ligthart T., Gijlswijk R van, EU Transport GHG: Routes to 2050 II, AEA, CE Delft, TEPR en TNO, April 2012.

Hill N., Life-Cycle Assessment for Hybrid and Electric Vehicles “Beyond the Tailpipe”, LowCVP Annual Conference 2013, Ricardo-AEA.

KNMI Klimaatatlas 1980-2010, [www.klimaatatlas.nl](http://www.klimaatatlas.nl)

Ligterink, N., Smokers, R. (TNO), Praktijkverbruik van zakelijke auto's en plug-in auto's, TNO-060-DTM-2013-01233, 2013, in opdracht van het Ministerie van IenM

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, NTNU, Environ.Sci.Technol. 2011, 45, 4548-4554.

Mettlach, H., Development of the Li-Ion battery for the Opel Ampera Extended-Range Electric Vehicle, Battery Technology, Wiesbaden, June 2010.

Nemry, F., Leduc G., Mongelli I., Uihlein A., Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car), IPTS, 2008.

Notter, D.A., Gauch M., Widmer R., Wäger P., Stamp A., Zah R., Althaus H.J., 2010: Contribution of Li-Ion batteries to the environmental impact of electric vehicles, Environ.Sci.Technol. 2010, 44, 6550-6556.

Odeh N., Hill N., Forster D., Current and Future Lifecycle Emissions of Key „Low Carbon“ Technologies and Alternatives, Final Report, Ricardo-AEA, April 2013.

Odeh, N., Hill N., Forster D., Current and future lifecycle emissions of key 'low carbon' technologies and alternatives, Ricardo-AEA, April 2013.

Opel Ampera - Drive the future now!, brochure, date unknown.

Samaras, C., Meisterling K, Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy, Environ.Sci.Technol. 2008, 42, 3170-3176, 2008.

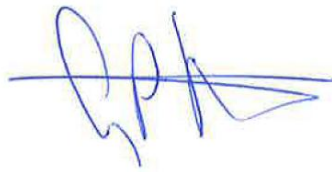
Technology roadmap electric and plug-in hybrid electric vehicles, International Energy Agency, update June 2011.

Verbeek, R. (TNO), Kampman, B. (CE Delft), Factsheets. Brandstoffen voor het wegverkeer: Kenmerken en perspectief, TNO en CE Delft, 2014.

VWE: <http://www.vwe.nl/Nieuws/Pers/Persberichten/Archief/porsches-achteraan-in-de-rij-naar-de-autosloop.aspx>

## 9 Ondertekening

Delft, 14 juli 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G.P.K.', with a horizontal line drawn through the middle of the letters.

Projectleider  
G. P. Koornneef

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R.N. van Gijlswijk', with a large, stylized initial 'R'.

Auteur  
R.N. van Gijlswijk

## A Literatuuronderzoek productie, onderhoud en afdanken

### Productie

Het literatuuronderzoek naar de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de productie van personenauto's wees uit dat deze wordt bepaald door de hoeveelheid staal, kunststoffen en aluminium enerzijds, en de batterij (indien aanwezig) anderzijds.

Het belangrijkste doel was het vinden van een consistente set materiaalsamenstellingen van voertuigen met verbrandingsmotor en voertuigen met elektromotor. De verschillen tussen de typen voertuigen komen immers het beste aan het licht als de overige verschillen zo klein mogelijk zijn.

Het artikel van Hawkins (2013, onderdeel van een promotieonderzoek) bood zo'n consistente set gegevens, opgesplitst naar voertuigonderdeel. Daarmee was het ook mogelijk om als afgeleide een plug-in voertuig te modelleren.

Voor het voertuig exclusief eventuele batterijen is eerst de absolute hoogte van de CO<sub>2</sub>-emissie geverifieerd met een aantal andere bronnen (Hill 2012, Ma et al. 2012), en ook de samenstelling in materialen (Hill 2012 vergelijkt samenstellingen van Lane 2006 en Tremove).

Daarnaast is ook gekeken of de CO<sub>2</sub>-uitstoot wezenlijk verandert bij de toepassing van lichtgewicht materialen zoals die in elektrische voertuigen meer worden toegepast: aluminium magnesium en koolstofvezel. In Hill 2012 is daar op basis van GREET 2.7 een analyse van gemaakt, en het blijkt dat de hogere CO<sub>2</sub>-uitstoot van lichtgewicht materialen per kg ongeveer gecompenseerd wordt door het geringere gewicht ervan, op het niveau van een personenauto.

De batterij is apart gemodelleerd. Vanwege de grote bijdrage en mogelijk snelle ontwikkelingen zijn daarvoor gegevens van verschillende bronnen naast elkaar gelegd. De bronnen zijn geselecteerd op recentheid en batterijtechnologie.

Samaras 2008	Li-ion	120	kg CO <sub>2</sub> e/kWh
Helms 2010	Li-ion	125	kg CO <sub>2</sub> e/kWh
Notter 2010	Li-ion	53	kg CO <sub>2</sub> e/kWh
Hawkins 2013	Li-FP	247	kg CO <sub>2</sub> e/kWh
Ellingsen 2013		172	Kg CO <sub>2</sub> e/kWh
<b>Mix (LiFePO<sub>4</sub>, LiMnO<sub>4</sub>, LiNCM)</b>		<b>143</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>e/kWh</b>

Het gemiddelde cijfer wordt bevestigd in een studie van (Ricardo AEA 2013). Bij een meta-analyse komen zij op 150 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh.

Omdat in de literatuur steeds een batterij van een bepaalde grootte wordt beschreven, is het van belang om te weten in hoeverre de productie-CO<sub>2</sub> wordt bepaald door niet direct aan de capaciteit gerelateerde zaken als behuizing en koeling, en hoeveel door de cellen zelf. Als een groot deel niet gerelateerd is aan de capaciteit, zullen we bij kleinere (plug-in-) batterijen een correctie moeten maken. Daar is geen reden voor gevonden tot dusver. De meest gedetailleerde analyse is van Majeau-Bettez 2011, zie de tabel hieronder. De meeste CO<sub>2</sub>-uitstoot is zeker variabel met de capaciteit, en van de laatste twee posten waarschijnlijk deels.

	Li-NCM	Li-FP
Battery & components manufacture	27%	27%
Positive electrode paste	35%	36%
Negative electrode paste	8%	7%
Electrode substrates	3%	3%
Module & battery casing	3%	3%
Battery management system	14%	14%
Others	10%	10%
	100%	100%

### Onderhoud en afdanking

Bij de bekeken studies is de bijdrage van onderhoud en afdanking beperkt. Onderhoud draagt ca. tien keer zo weinig bij als productie in Nemry 2008, en in Ma et al., 2012 wordt een CO<sub>2</sub>-schaalfactor gezet in verband met beperkt beschikbare gegevens en sterk wisselende praktijk.

Afdanking heeft een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 2% (Nemry 2008) tot ca. 10% (Odeh, 2013) ten opzichte van de productie-CO<sub>2</sub>. In Notter 2010 bedraagt de uitstoot als gevolg van onderhoud en afdanking samen ca. 10% van de productie-CO<sub>2</sub>.

Er is vanwege het geringe belang ervoor gekozen om dezelfde bron te gebruiken voor afdanking als voor productie: Hawkins 2013. De afdanking van de batterij is vrij weinig over bekend. Op basis van de cijfers van Hawkins 2013 is de bijdrage ervan aan de afdankings-CO<sub>2</sub> verhoudingsgewijs ongeveer even groot als bij de productie.