

Pilotprojecten innovatieve bussen

Monitoring Whisper plug-in dieselhybrides in Apeldoorn

Rapport
Delft, maart 2015

Opgesteld door:
L.C. (Eelco) den Boer (CE Delft)
A.H. (Anouk) van Grinsven (CE Delft)
A. (Age) van der Mei (Duinn)
M. (Marcel) Brouwer (Duinn)



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

L.C. (Eelco) den Boer (CE Delft), A.H. (Anouk) van Grinsven (CE Delft), A. (Age) van der Mei (Duinn), M. (Marcel) Brouwer (Duinn)

Pilotprojecten innovatieve bussen

Monitoring Whisper plug-in dieselhybride in Apeldoorn

Delft, CE Delft, maart 2015

Autobussen / Innovatie / Dieselolie / Elektriciteit / Monitoring

Publicatienummer: 15.4827.25

Opdrachtgever: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland Utrecht.

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Eelco den Boer.

© 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 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

1	Zeven projecten	5
1.1	Duurzame pilotprojecten in het busvervoer	5
1.2	Alfa- en bètaprojecten	5
1.3	Monitoringsmethodiek	6
2	Resultaten Whisper-bus in Apeldoorn	9
2.1	Introductie	9
2.2	Busgegevens	10
2.3	Inzet in de dienstregeling	11
2.4	Brandstofverbruik	13
2.5	CO ₂ -emissies	16
2.6	Gebruikerservaringen	18
2.7	Onderhoud	18
3	Conclusie en toekomst-verwachting	21
Bijlage A	Overzicht projecten	23





1 Zeven projecten

1.1 Duurzame pilotprojecten in het busvervoer

Het openbaar vervoer is bij uitstek geschikt om duurzame innovatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën te beproeven, die nodig zijn voor een duurzame samenleving waarin de uitstoot van broeikasgassen sterk afgenomen is. Zeven pilotprojecten hebben subsidie ontvangen van het ministerie van Verkeer en Waterstaat, met als tegenprestatie de innovatieve aandrijftechnologieën en brandstoffen toe te passen in de dienstregeling van vervoerders. Geen van deze technologieën is eerder in Nederland in een dienstregeling toegepast.

De doelstelling van elk project was om gedurende minimaal twee jaar bussen in te zetten en de prestaties te monitoren. Van alle zeven pilotprojecten is een monitoringsrapportage opgesteld met als doel stakeholders in het openbaar vervoer te informeren over de mogelijkheden van de toegepaste technologieën. Deze partijen zijn onder andere concessieverleners, lokale overheden en vervoerders.

Dit rapport beschrijft de resultaten van de pilot met de plug-in hybride bussen in Apeldoorn.

1.2 Alfa- en bètaprojecten

Niet alle technologieën bevinden zich in een zelfde ontwikkelingsfase. Daarom is binnen de subsidieregeling onderscheid gemaakt in alfa- en bètaprojecten.

Een alfaproject wordt beschouwd als een eerste kleine veldtest. Op basis van de test zal een alfaproject opgeschaald kunnen worden naar een industrieel ontwerp. Bij alfaprojecten gaat het om nog niet-beproefde innovatieve technologieën, waarbij een geschat CO₂-reductiepotentieel van 50% gevraagd is, en een te verwachten jaarkilometrage van rond de 10.000 km.

Een bètaproject betreft het testen van een nulserie, als vervolg op een alfaproject. Het betreft een industrieel opschaalbaar ontwerp. De nulserie dient, na het pilotproject, te kunnen worden ingezet in een dienstregeling met vooraf vastgestelde operationele kenmerken. Omdat de technologieën veelal minder innovatief zijn dan bij de alfaprojecten wordt een geschat CO₂-emissiereductiepotentieel gevraagd van 25%. Van een bètaproject is vanwege de ontwikkelingsfase en hogere betrouwbaarheid een inzet gevraagd van rond de 30.000 km op jaarbasis.

In Tabel 1 zijn de innovatieve busprojecten opgenomen, inclusief de belangrijkste karakteristieken van de projecten.



Tabel 1 Overzicht projecten

Locatie project	Aantal bussen	Aandrijflijnconcept	Energie-drager	Elektro-motoren	Energie-opslag	Plug-in
Alfaprojecten						
Enschede	2	Seriehybride	Diesel	1 centraal geplaatste elektromotor	Ultracaps	Nee
Eindhoven	2	Conventioneel, met nagenoeg smoorvrije gasmotor	LNG/LBG	-	-	Nee
Amsterdam	2	Brandstofcel-seriehybride	Waterstof	1 centraal geplaatste elektromotor	Accu en ultracaps	Nee
Rotterdam	2	Seriehybride	Diesel	2 naafmotoren (zonder eind-reductie)	Accu	Ja
Bètaprojecten						
Apeldoorn	4	Seriehybride	Diesel	2 naafmotoren (zonder eind-reductie)	Accu	Ja
Leiden, Gouda, Alphen a/d Rijn	4	Seriehybride	Diesel	2 centraal geplaatste elektro-motoren	Ultracaps	Nee
Rotterdam	2	Seriehybride	Diesel	4 naafmotoren (met eind-reductie)	Accu	Nee

1.3 Monitoringsmethodiek

De praktijkproeven met OV-bussen leveren nieuwe informatie over de prestatie van innovatieve bustechnologieën. Doel van de monitoring is om de technische prestatie van de bussen in kaart te brengen en deze prestatie ook in perspectief te plaatsen.

Busgegevens

Bij aanvang van de pilotprojecten is informatie verzameld over de technische eigenschappen van de bussen en waar van toepassing over de laadinfrastructuur. Daarnaast is in kaart gebracht hoe de bussen zijn ingezet, omdat dat een sterke relatie heeft met het energiegebruik.

Operationele monitoring

Tijdens de looptijd van de pilotprojecten zijn de operationele busgegevens bijgehouden en vastgelegd. Om de prestatie van de bussen te kunnen beoordelen zijn gegevens verzameld over:

- de dienstregeling waarop de bus is ingezet;
- de afgelegde afstand;
- het brandstofverbruik, en waar van toepassing het elektriciteitsverbruik;
- de gemiddelde bezettingsgraad;
- het energieverbruik door specifieke bussystemen (zoals de airconditioning en de standkachel).

Naast deze kwantitatieve informatie is ook de gebruikerstevredenheid in kaart gebracht door middel van een enquête onder chauffeurs, reizigers en monteurs. Daarnaast zijn gegevens vastgelegd over uitval en onderhoud van de bussen.





2 Resultaten Whisper-bus in Apeldoorn

2.1 Introductie

Het pilotproject is uitgevoerd door de provincie Gelderland in samenwerking met e-Traction, de gemeente Apeldoorn, Veolia, Eneco en de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN). De provincie Gelderland en de gemeente Apeldoorn ondersteunden het project financieel. e-Traction heeft vier bestaande Volvo-bussen voorzien van een plug-in hybride aandrijflijn. Eneco trad op als projectsponsor door aanleg van de laadpunten en levering van groene stroom en studenten van de HAN verzorgden de monitoring. De bussen reden in de dienstregeling in Apeldoorn.

Het Whisperproject is gepresenteerd in juli 2009 en na een testperiode met chauffeurs van Veolia is de eerste bus ingezet in de dienstregeling in november 2009. Vanaf het voorjaar van 2010 is de tweede bus in de dienstregeling opgenomen. Het project zou aanvankelijk eind 2010 worden afgerond, samenvallend met het einde van de concessieperiode. Door vertragingen waren de derde en vierde bus respectievelijk eind 2010 en begin 2011 gereed. Vanwege de overgang van de concessie van Veolia naar Syntus zijn de derde en vierde bus niet meer in de dienstregeling gekomen, maar overgeplaatst naar het Zweedse Umeå. Deze bussen zijn geen onderdeel geworden van de monitoring. De eerste twee bussen, nummer 5401 en 5402, zijn na de overgang van de concessie wel in de stadsdienst van Apeldoorn blijven rijden.

De uiteindelijke monitoringsperiode van het project liep vanaf het inzetten van de eerste bus op 11 november 2009 tot de laatste registratie op 31 december 2012. De informatie in deze rapportage is gebaseerd op de monitoringsdata, zoals bijgehouden en opgeleverd door de projectpartijen.

Beschrijving van de techniek

De bustechniek betreft een standaard 12-meter dieselbus uitgerust met een seriehybride aandrijflijn met naafmotoren. Deze naafmotoren zijn door e-Traction ontwikkeld en wordt door het projectteam 'The Wheel' genoemd. De naafmotoren zijn bijzonder, omdat ze deel uitmaken van het wiel zelf ('direct drive') en geen naafreductie hebben. De energieopslag bestaat uit een accupakket dat vanuit het elektriciteitsnet kan worden bijgeladen ('plug-in'). Het accupakket is op het dak van de bus geplaatst.

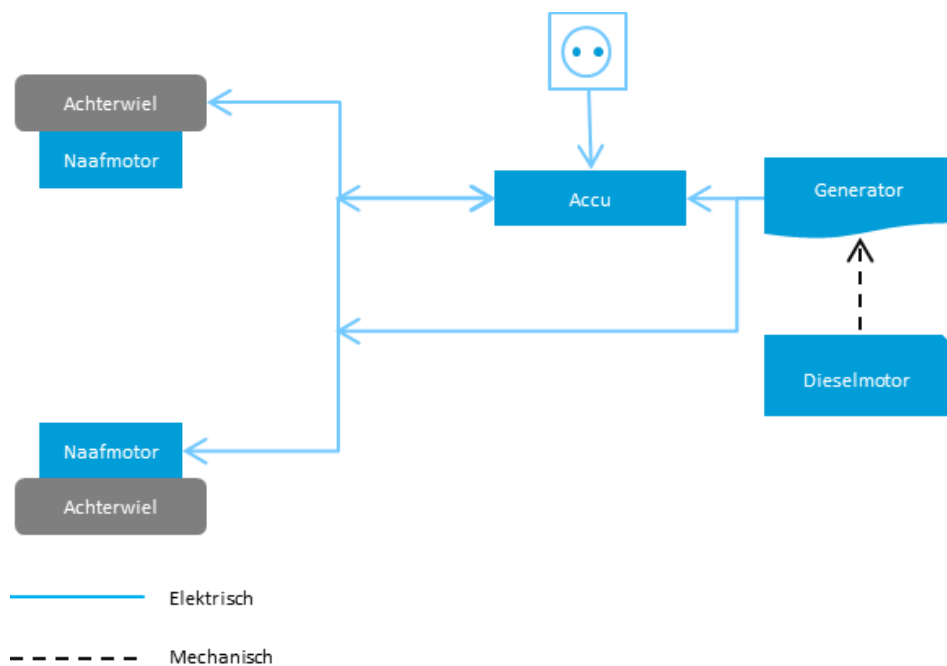
Als de accu voldoende geladen is rijden de bussen volledig elektrisch. Wanneer de acculading onder een kritische waarde zakt schakelt de dieselgenerator in. Het energiemanagementsysteem bepaalt de meest energiezuinige energieleveringstrategie. Met behulp van GPS kan het managementsysteem bovendien rekening houden met de wens om in bepaalde gebieden emissievrij te rijden.

De combinatie van directe elektrische aandrijving, het terugwinnen van remenergie en het gebruik van een kleine dieselmotor als generator zou moeten leiden tot een lager brandstofgebruik dan bij een reguliere dieselbus.



In Figuur 1 is een schematische weergave van de aandrijving van de hybride bus voor dit project weergegeven.

Figuur 1 Schematische weergave aandrijving plug-in serieel hybride bussen



2.2 Busgegevens

In Tabel 2 zijn de belangrijkste kenmerken van de beide bussen gegeven die in Apeldoorn zijn ingezet.

Het betreft twee omgebouwde 12 meter standaard dieselbussen. Bus 5401 betreft een omgebouwde Volvo 7000, bus 5402 betreft een, iets nieuwere, Volvo 7700.

Tabel 2 Busgegevens van de dieselhybride Whisper-bussen

Categorie		Waarde	Eenheid
Voertuig	Aantal bussen	2 (5401 en 5402)	
	Leeggewicht	13.735/14.404	kg
	Lengte	12	m
	Aantal zitplaatsen	33/32	
	Leverancier	Volvo	
	Lage vloer	Ja	
Aandrijving	Aandrijving	Seriële hybride, 4 x 2 d.m.v. twee wielnaaf-elektromotoren	
	Regeneratief remmen	Ja	
Dieselmotor	Maximaal vermogen	70	kW
	Maximaal koppel	420	Nm
	Motorinhoud (slagvolume)	3,0	l
	Emissienorm	Stage IIIA-J	
Generator	Maximaal vermogen	33	kW

Categorie		Waarde	Eenheid
Brandstoftank	Inhoud	250	l
Uitlaatgas-behandeling	Roetfilter	Nee	
	Oxidatiekatalysator	Nee	
	SCR denox	Nee	
	Uitlaatgasrecirculatie (EGR)	Nee	
Elektromotor	Aantal	2	
	Vermogen voor tractie (piek)	2 x 75	kW
	Vermogen voor tractie (continu)	2 x 50	kW
	Maximaal koppel	2 x 7.500	Nm
Accu's	Type	Valence Technology U27 -12XP	
	Energie-inhoud	106	kWh
	Maximaal vermogen	212	kW
	Gewicht	1.170	kg
Klimaatcontrole	Airco type	Hispacold 9A	
	Vermogen airconditioning	NB	kW
	Verwarming type	Webasto	
	Vermogen verwarming	30	kW

2.3 Inzet in de dienstregeling

Inzet in het concessiegebied

Naast de busspecifieke eigenschappen bepaalt ook het concessiegebied waar de bussen worden ingezet het brandstofverbruik. De twee hybride bussen zijn ingezet in de concessie Veluwe. Het geplande inzetprofiel van de bussen was inzet van de bussen op lijn 11 van de stadsdienst van Apeldoorn.

De Whisper 5401 was het eerst gereed en is ingezet op lijn 11 op 9 november 2009. De Whisper 5402 volgde ruim vier maanden later en is voor het eerst op 15 maart 2010 ingezet op dezelfde lijn.

De kenmerken van lijn 11 zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Kenmerken lijn 11

Bus-lijn	Lengte buslijn (km)	Aantal haltes	Aantal verkeerslichten	Aantal* stops per km	Aandeel traject binnen bebouwde kom (%)	Aantal hellingen in traject	Nominale ritduur (gepland in dienstregeling) (hh:mm)	Gem. snelheid (km/h)
11	22	40	n.b.	1,8	100%	n.b.	00:56	20,5

* Aantal stops is berekend over het aantal haltes en het aantal verkeerslichten. Wanneer het aantal verkeerslichten niet bekend is geeft dit cijfer slechts het aantal haltes per kilometer weer.

Inzet gedurende de monitoringsperiode

De Whisper bussen hebben tot eind juni 2010 op stadlijn 11 gereden in de dienstregeling en zijn daarna niet meer door Veolia ingezet. De 5401 is 99 keer aan de dienstregeling begonnen en 22 keer vroegtijdig uitgevallen als gevolg van storing. Van tien ritten is geen informatie beschikbaar.



De 5402 is in totaal 64 keer ingezet op lijn 11 waarbij van twee ritten bekend is dat ze zijn uitgereden. Van 40 van de 64 ritten is geen ritinformatie beschikbaar.

Van juni 2010 tot en met eind november 2010 zijn er geen registraties beschikbaar omdat de bussen niet gereden hebben of omdat de data verloren is gegaan. In de laatste drie weken voor het overdragen van de concessie op 12 december 2010 aan Syntus zijn nog zeven testritten uitgevoerd met de 5401 en nog 11 testritten met de 5402.

Omdat de Whisper geen onderdeel uitmaakte van de aanbesteding zijn er vooraf geen afspraken gemaakt over de inzet van de bussen. Pas na het sluiten van een nieuwe overeenkomst in 2011 tussen stichting The Whisper, de provincie Gelderland en Syntus kon begin 2012 weer worden gereden.

In de tussentijd zijn de bussen omgebouwd en getest, en zijn uitsluitend testritten gemaakt. In deze periode zijn 49 testritten gemaakt met de 5401 en 33 testritten met de 5402.

Vanaf eind maart 2012 zijn de bussen door Syntus ingezet in de stadsdienst van Apeldoorn. De 5402 begon op 28 maart, de 5401 op 2 april. De bussen zijn wisselend ingezet op de stadslijnen 118, 120 en 130.

De 5401 is in totaal 96 keer ingezet door Syntus, de 5402 heeft 136 keer gereden.

De inzet door Syntus liep officieel tot 31 december 2012 maar vanaf oktober is de 5401 niet meer ingezet door technische problemen met de elektronica en de naafmotoren. De 5402 heeft doorgereden tot 16 november 2012, maar is daarna wegens defecten uit de dienstregeling gehaald.

Als de bussen niet rijden, rijden ze niet vanwege onderhoud, modificaties of zijn ze gestald in de garage van e-Traction. Zie ook Paragraaf 2.6 Onderhoud.

In Tabel 4 te zien hoeveel dagen per jaar de verschillende bussen in de dienstregeling zijn ingezet.

Tabel 4 Inzet inclusief testritten (in aantal dagen)

	5401		5402	
	Dienstregeling	Testrit	Dienstregeling	Testrit
2009	6		-	
2010	93	7	37	
2011		29	13	24
2012	136	31	96	26
Totaal aantal dagen ingezet tijdens monitoringsperiode	235	67	146	50



Bezetting

De bezettingsgraad van de bussen is gemeten door de belading op de assen te meten met behulp van een Kimax II Systeem van VDO. Door incomplete dagregistraties is het niet mogelijk om de geregistreerde beladingsgraden om te zetten naar een betrouwbare gemiddelde bezettingsgraad. De belading is maar voor een beperkt aantal dagen geregistreerd. In het geval dat er wel gegevens beschikbaar zijn, varieert de gerapporteerde belading van onder het leeggewicht van de bus tot drie keer het toegestane laadvermogen. Deze gegevens worden daarom als onbetrouwbaar beschouwd en onbruikbaar om de bezettingsgraad vast te stellen.

Kilometrage

Het kilometrage is afgeleid uit de dagelijkse mutatie van de kilometerstand na een correct en volledig geregistreerde rit. Deze zijn weergegeven in Tabel 5.

Naast de kilometers op basis van de volledig geregistreerde ritten toont de tabel het totale jaarkilometrage dat is afgeleid uit de mutatie van kilometerstand aan het begin en het eind van het jaar.

Tabel 5 Geregistreerde en totaal afgelegde afstanden per bus per jaar (km)

	Jaar	5401	5402
Geregistreerde kilometers	2009	869	
<i>Kilometerstandmutatie</i>		869	
Geregistreerde kilometers	2010	935	1.571
<i>Kilometerstandmutatie</i>		19.229	10.680
Geregistreerde kilometers	2011	3.303	739
<i>Kilometerstandmutatie</i>		3.371	1.319
Geregistreerde kilometers	2012	12.425	18.574
<i>Kilometerstandmutatie</i>		13.360	16.748

Uit de beschikbare monitoringsdata blijkt niet hoeveel van de kilometers volledig elektrisch zijn gereden.

Het is niet mogelijk om aan te geven hoeveel kilometer er in de dienstregeling is gereden aangezien voor slechts zes dienstregelingritten voor 2012 het dagkilometrage volledig is geregistreerd.

2.4 Brandstofverbruik

De Whispers zijn gebouwd om volledig elektrisch te rijden tot het moment dat de acculading onvoldoende is, of totdat meer elektriciteit wordt gevraagd dan de accu's kunnen leveren. Wanneer dat het geval is springt de dieselgenerator bij.

De bussen tanken en laden in principe aan het einde van elke inzet zowel diesel als (groene) elektriciteit. Tevens worden dan kilometerstanden geregistreerd. Alle bussen worden bij een tankbeurt volledig gevuld. Door het energieverbruik te koppelen aan de kilometerstanden kan het brandstofverbruik per bus worden bepaald. Echter, in de monitoringsdata ontbreekt voor veel inzetdagen hetzij de kilometerregistratie, hetzij de tankregistratie.



Vanwege de lage kwaliteit van de beschikbare informatie tot aan de inzet van de bussen door Syntus in 2012 wordt er onderscheid gemaakt tussen het verbruik in de periode voor en na de overname door Syntus.

In Tabel 6 is voor beide Whispers een overzicht gegeven van de beschikbare informatie tot aan de inzet door Syntus in 2012.

Tabel 6 Beschikbare Brandstofregistratie tot en met 2011

	5401		5402	
Totaal kilometrage in monitoringsperiode	23.469	-	11.999	-
Km in volledige dagregistratie *	-	3.053	-	1.512
Totaal dieselvebruik in periode (l)	8.352	-	2.085	-
verbruik in volledige dagregistratie *	-	1.378	-	639
Totaal geladen elektriciteit (kWh)	3.358	-	1.958	-
geladen in volledige dagregistratie *	-	850	-	410

* = Volledige dagregistratie is een registratie waarvan zowel kilometrage, dieselvebruik als geladen elektriciteit correct en volledig zijn bijgehouden.

Wanneer wordt gekeken naar de periode van 783 dagen tussen 9 september 2009 tot 31 december 2011, zijn er in totaal op 139 dagen ritten geregistreerd voor bus 5401. Op slechts 22 dagen hiervan is de registratie volledig.

Voor bus 5402 zijn er in de periode van 15 oktober 2010 tot 31 december 2011, op een totaal van 658 mogelijke dagen, op 58 dagen data beschikbaar. Voor slechts 15 dagen is een volledige registratie beschikbaar.

Dit betekent dat een groot aantal datapunten mist van het reeds kleine aantal gereden ritten en dat er geen trends kunnen worden afgeleid over periodes van een week of langer.

Op basis van de beperkte correcte registraties van de uit het net geladen elektriciteit en de getankte diesel blijkt onderstaande brandstofverbruik in hybride inzet tot en met 2011, zie Tabel 7.

Tabel 7 Brandstofverbruik in de monitoringsperiode tot 2012

	5401	5402
Totaal aantal kilometer	3.053	1.512
Totaal getankte brandstof (liter diesel)	1.378	639
Totaal geladen elektriciteit (kWh)	850	410
Dieselvebruik (l/100 km)	45.1	42,3
Elektriciteitsverbruik (kWh/100 km)	27.8	27.1

Vanaf 2012 ontstaat er een ander beeld. De registratie in de concessieperiode van Syntus is vollediger en de bussen hebben vaker de afgelegde kilometers elektrisch gereden zoals blijkt uit Tabel 8.

Van de 347 potentiële datapunten zijn er 145 geregistreerd, hiervan zijn 45 volledig voor bus 5401. Voor bus 5402 is in 2012 op 183 dagen ritinformatie verzameld, waarvan 62 registraties volledig zijn.



Tabel 8 Brandstofregistratie in 2012

	5401		5402	
Totaal kilometrage in monitoringsperiode	13.360	-	18.574	-
Km in volledige dagregistratie *	-	5.957	-	9.429
Dieserverbruik in periode	2.333	-	4.072	-
Liter in volledige dagregistratie *	-	1.994	-	3.382
Totaal geladen elektriciteit (kWh)	8.999	-	11.348	-
kWh in volledige dagregistratie *	-	3.510	-	5.049

* = Volledige dagregistratie is een registratie waarvan zowel kilometrage, dieserverbruik als geladen elektriciteit correct en volledig zijn bijgehouden.

Het grotere aandeel elektrisch vertaalt zich in lagere verbruikscijfers van beide bussen en bovendien liggen de verbruikscijfers dicht bij elkaar.

Tabel 9 Brandstofverbruik in de monitoringsperiode in 2012

	5401	5402
Totaal aantal kilometer	5.957	9.429
Totaal getankte brandstof (l, diesel)	1.994	3.382
Totaal geladen elektriciteit (kWh)	3.510	5.049
Dieserverbruik (l/100 km)	33,5	35,9
Elektriciteitsverbruik (kWh/100 km)	58,9	53,5

Belangrijk is om te vermelden dat het brandstofverbruik inclusief het gebruik van de Webasto-standkachel is. Door het ontbreken van een reguliere dieselmotor voor de aandrijving, komt de verwarming van de bus geheel voor rekening van de standkachel. Het Webasto dieserverbruik ligt daarom hoger dan bij een reguliere bus. e-Traction voert aan dat het verbruik van de standkachel relatief hoog ligt door de korte inzetduur in de dienstregeling. Het verbruik van de Webasto-standkachel is niet apart geregistreerd door de projectpartijen.

Vergelijk met referentiebus voor de 2012 gegevens

In samenwerking met Veolia is door e-Traction een referentietest aangeleverd van stadbussen in Apeldoorn. Deze referentiegegevens zijn verzameld gedurende het eerste kwartaal van 2010. Het is onbekend op welke lijnen de conventionele dieselbussen hebben gereden, met wat voor belading en onder welke omstandigheden. Het is daarom onzeker of sprake is van een nauwkeurige referentiesituatie.

De referentiebusse betreffen conventionele 12 meter Volvo 7700 stadbussen waarmee Veolia het OV in Apeldoorn heeft verzorgd tot 2011. Het is, ook bij navraag, onbekend welk bouwjaar, Euronorm, leeggewicht of configuratie de referentiebus heeft.

Uit de referentietest van e-Traction en Veolia blijkt dat het brandstofverbruik van de conventionele standaard stadsbus 43,9 liter per 100 km bedraagt.

Om een correcte vergelijking tussen het brandstofverbruik van dieselbussen en plug-in hybride bussen te maken dient een vergelijking van de totale energie-keten gemaakt te worden (well-to-wheel¹). Om het toekomst-potentieel van een (plug-in) elektrische bus naar voren te laten komen is zowel de huidige energiemix als ook duurzaam opgewekte elektriciteit in ogenschouw genomen.

In Tabel 10 is een vergelijking gemaakt tussen het primair fossiel energiegebruik van de referentiebus en de Whisper op basis van de huidige elektriciteitsmix en op basis van duurzame elektriciteit. Het primair fossiel energiegebruik is bepaald op basis van een energie-inhoud van 36 MJ per liter diesel met een productierendement van 81%² en op basis van 3,6 MJ per kWh elektriciteit met een productierendement van 49,6%³. De hoeveelheid fossiele primaire energie benodigd bij het produceren van elektriciteit uit zon en wind is nihil.

Tabel 10 Primair fossiel energiegebruik Whisper-bussen in 2012 t.o.v. referentie

Referentie	Diesel (l/100 km)	Elektriciteit (kWh/100 km)	Totaal primair fossiel energiegebruik (MJ/km)
Referentiebus	43,9	n.v.t.	19,5
5401			
Diesel+ huidige elektriciteitsmix	33,5	58,9	19,2
Diesel + elektriciteit o.b.v. zon en wind	33,5	58,9	14,9
5402			
Diesel+ huidige elektriciteitsmix	35,9	53,5	19,8
Diesel + elektriciteit o.b.v. zon en wind	35,9	53,5	15,9

Uit Tabel 10 blijkt dat in 2012 het primair fossiel energiegebruik in het geval van het gebruik van duurzaam opgewekte elektriciteit significant lager is geweest (18-24%) dan dat van de referentiebus of de plug-in hybride bus bij gebruik van de huidige elektriciteitsmix.

2.5 CO₂-emissies

De well-to-wheel CO₂-emissies zijn gebaseerd op het totale brandstofverbruik, inclusief het verbruik als gevolg van standkachel en airco. De totale CO₂-uitstoot is berekend door zowel het brandstofverbruik als het elektriciteitsverbruik over de totale energieketen mee te nemen. Daarbij hebben we gebruik gemaakt van de CO₂-emissiefactoren uit Tabel 11.

¹ De reden hiervoor is dat de energieverliezen bij elektrische aandrijving voornamelijk in de energiecentrale liggen, terwijl deze voor een verbrandingsmotor voornamelijk in het voertuig liggen.

² Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, WTT appendix 2, description and detailed energy and GHG balance of individual pathways, JRC, CONCAWE, EUCAR, 2011.

³ Berekening van de CO₂-emissies, het primair energiegebruik en het rendement van elektriciteit in Nederland, Agentschap NL, CBS, ECN en PBL, september 2012.



Tabel 11 WTW-emissiefactoren voor diesel en elektriciteit

Brandstof	Emissiefactor Weel-to-wheel	
Diesel	3.135	g CO ₂ -eq./liter
Huidige elektriciteitsmix	455	g CO ₂ -eq./kWh
Elektriciteit o.b.v. wind of zon	15	g CO ₂ -eq./kWh

Bron: SKAO⁴.

Ook voor het bepalen van de CO₂-uitstoot is zowel met de huidige energiemix, als met CO₂-emissiefactoren van duurzaam opgewekte elektriciteit gerekend. Het verschil tussen de emissiefactoren laat goed zien dat er nog een groot potentieel is voor vermindering van de uitstoot van CO₂ wanneer de huidige elektriciteitsmix⁵ in de komende decennia verder wordt vergroend.

In Tabel 12 is de CO₂-uitstoot van de bussen weergegeven, voor verschillende elektriciteitsmixen. Bus 5401 stoot per km gemiddeld minder CO₂ uit dan bus 5402. Dit kan mede verklaard worden door een relatief hoger aantal 'elektrische' kilometers, zie Tabel 12.

Tabel 12 Gemiddelde CO₂-uitstoot per km per bus in 2012

Bus	Huidige elektriciteitsmix	Wind- of zonne-energie
	gCO ₂ -eq./km	gCO ₂ -eq./km
5401	1.318	1.050
5402	1.369	1.125

Vergelijk met referentiebus

In Tabel 13 is de CO₂-reductie ten opzichte van de referentie weergegeven in percentages, ook inclusief airco en standkachel.

Tabel 13 Reductie in CO₂-uitstoot ten opzichte van referentie in 2012

Bus	g CO ₂ -eq./km (wind/zon- huidige electriciteitsmix)	Reductie t.o.v. referentiebus (huidige electriciteitsmix)	Reductie t.o.v. referentiebus (wind- of zonne- energie)
Referentie (diesel)	1.376	-	-
5401	1.050-1.318	4,2%	24%
5402	1.125-1.369	0,5%	18%
Gemiddelde beide bussen	1.088-1.344	2,3%	21%

Tabel 13 illustreert dat de mate van CO₂-reductie sterk samenhangt met de elektriciteitsmix. Met andere woorden: bij verdere verduurzaming van de elektriciteitsmix neemt de CO₂-uitstoot van de plug-in hybride bussen af ten opzichte van de referentiebus⁶.

⁴ http://www.milieubarometer.nl/uploads/files/Lijst_emissiefactoren_SKAO_Connekt_Stimular.pdf.

⁵ Alhoewel de Whisper op groene stroom gereden heeft, is het niet terecht om enkel de vergelijking met groene stroom te maken, omdat de beschikbaarheid van groene stroom niet door de gebruiker wordt bepaald, maar door de overheid op basis van doelen en subsidies.



2.6 Gebruikerservaringen

2.6.1 Reizigers

Gedurende de projectperiode zijn geen gebruikerservaringen van reizigers gemonitord of aangeleverd.

2.6.2 Chauffeurs

Gedurende de projectperiode zijn er geen gebruikerservaringen van chauffeurs gemonitord of aangeleverd.

2.6.3 Monteurs

Gedurende de projectperiode zijn er geen gebruikerservaringen van monteurs gemonitord of aangeleverd.

2.7 Onderhoud

De bussen hebben het grootste deel van de tijd, met name in het begin van de periode, vanwege onderhoud en modificaties. Dit heeft in 2010 het vertrouwen van de vervoerder Veolia in de voertuigen geschaad.

De noodzaak tot onderhoud wordt door verschillende aspecten veroorzaakt. We onderscheiden hierbij:

- regulier onderhoud en instructie vergelijkbaar met conventionele bussen;
- modificaties waarbij doorontwikkeling van de technologie centraal staat, zowel software- en hardwarematige updates;
- onderhoud en storingen gerelateerd aan de hybride technologie: aandrijflijn en energieopslag.

Regulier onderhoud

Gedurende de gehele monitoringsperiode is het onderhoud uitgevoerd door e-Traction. Voor dit project zijn twee oude bussen als platform genomen. Er is daarom relatief vaak uitval geweest door problemen gerelateerd aan de leeftijd van de bussen. Zo moest de boordcomputer worden gereviseerd, waren er problemen met de luchtvering, elektronica van het remsysteem en de deuren.

Modificaties

Naast het reguliere onderhoud vond ook onderhoud plaats om de technologie te optimaliseren. Zo zijn de bussen voorzien van nieuwe elektrische compressoren, zijn de generatorkoppelingen voorzien van axiaalveren in plaats van rubberen veerelementen, is de radiator vervangen, zijn de bestaande wielagers vervangen voor efficiëntere lagers en moesten de wielbouten worden vervangen.

Voor het vergroten van de volledig elektrische actieradius is het accupakket verdubbeld, zijn de regelingen van de auxiliaries aangepast van 24 volt DC naar 400 Volt DC, is de range-extender gekalibreerd en de generator vervangen.

Reparaties/storingen gerelateerd aan de hybride technologie

De storingen gerelateerd aan de hybride technologie kunnen worden onderverdeeld in storingen door bedieningsfouten en technische storingen. De elektrische systemen waren aanvankelijk niet goed op elkaar afgestemd. Dit zorgde voor warmteproblemen wanneer individuele onderdelen zwaarder werden belast dan waar ze voor zijn berekend.



Uit de inzet in dienstregeling is ook naar voren gekomen dat de stoepranden een zware belasting bleken voor de wielen en de naafmotoren. De wielen hebben een andere ophanging dan reguliere bussen en krijgen andere krachten te verwerken bij het raken van stoepranden. Als oplossing is de magneet/ rotorverbinding verbeterd en zijn de wielbouten vervangen door sterkere exemplaren om afbreken te voorkomen.

Verder is er een aantal kortsluitingen en overige storingen geweest doordat onderdelen van het elektrische systeem beschadigd raakten tijdens het rijden, of dat ze te zwaar belast werden en zo oververhit raakten.





3 Conclusie en toekomstverwachting

In het project zijn twee van de vier gebouwde bussen in een periode van drie jaar in totaal slechts 381 keer begonnen in de dienstregeling. Wat de inzet betreft heeft het project daarmee niet voldaan aan de beoogde doelen en verwachtingen.

De naafmotoren zijn ingezet in bestaande dieselbussen. Mede daardoor vielen de bussen in het begin van de monitoringsperiode relatief vaak uit, ook door problemen die niet aan de aandrijving gerelateerd zijn. Het vele uitvallen heeft niet alleen tijd gekost, maar uiteindelijk ook het vertrouwen van de vervoerder in deze bussen geschaad en heeft er toe geleid dat de bussen halverwege 2010 uit de dienst zijn gehaald. Bij de nieuwe aanbesteding van de concessie voor 2011 zijn geen afspraken gemaakt over de inzet van de Whispers. Hierover moest na de gunning worden onderhandeld, wat voor veel vertraging voor het vervolg van de inzet in de dienstregeling zorgde. Een groot deel van de geplande projecttijd vormde in feite (om)bouwtijd. Er zijn diverse modificaties geweest die, om een veelheid aan redenen, steeds veel tijd hebben gekost.

Stichting The Whisper geeft in een toelichting op de beperkte inzet aan dat het Whisperproject het doel had de toepasbaarheid van de naafmotor, 'The Wheel', in stadsbussen te toetsen. Dit heeft geleid tot een projectinzet waarin de bussen niet primair getest zijn op praktische inzetbaarheid in een dagelijkse dienstregeling, maar als onderzoekstraject hebben gediend om het aandrijfsysteem verder te ontwikkelen. Door verschillende modificatierondes bij e-Traction is de effectieve inzetperiode van de bussen in de dienstregeling sterk beperkt door de trade-off tussen inzetbaarheid en techniekontwikkeling.

Gedurende de projectperiode is bij een inbraak de computer gestolen waarop een groot deel van de monitoringsdata van de inzet van vóór 2011 door Veolia stond. De monitoringsinformatie uit die periode die wel beschikbaar is, is onvoldoende of niet volledig bijgehouden. Op basis van het kleine aantal observaties is het niet mogelijk om conclusies te trekken over het presteren van de plug-in dieselhybride bussen in de dienstregeling van Veolia of de potentie van het aandrijfsysteem.

De kwaliteit van de dataregistratie vanaf 2012 door Syntus is beter, maar ook zeker niet foutloos en beslaat een periode van slechts negen maanden. De prestaties van de bussen en de aandrijflijn zijn niet voldoende geregistreerd en beschikbaar voor een nauwkeurige en volledige beschouwing van de techniek.

Een indicatie wat betreft de prestaties is dat het primaire energiegebruik ongeveer gelijk ligt bij gebruik van de huidige elektriciteitsmix, en ongeveer 20% lager bij gebruik van 'groene' elektriciteit. De kanttekening die hierbij moet worden geplaatst is dat de bussen eind 2012 door Syntus op minder zware lijnen zijn ingezet.



De belangrijkste bevindingen Whisper diesel plug-in hybride bussenproject zijn:

- het aantal waarnemingen en de kwaliteit van de monitoringsdata is onvoldoende om een betrouwbare vergelijking te kunnen maken tussen het energie- en dieselvebruik van The Whispers in de dienstregeling met een reguliere dieselbus in dezelfde dienstregeling;
- het is technisch mogelijk om naafmotoren zoals 'The Wheel' in te zetten in 12-meter bussen;
- de Whispers hebben zich niet gedurende langere periodes kunnen bewijzen als volwaardige bussen in een dienstregeling door een combinatie van technische problemen en de overgang naar een nieuwe concessie;
- kwetsbaarheden in het traject zaten zowel in de aandrijftechniek als in het combineren van verschillende nieuwe energiesystemen op een oud platform.

Vervolgstappen na de pilotperiode

Het Whisperproject is er niet in geslaagd om de bussen gedurende langere periode te toetsen in de dienstregeling. Alleen in de eerste maanden is de geplande lijninzet uitgevoerd. Door een relatief groot aantal storingen zijn de bussen door de vervoerder Veolia een half jaar voor het aflopen van de concessie uit de dienstregeling gehaald. Er werd gefocust op de ontwikkeling van de Zweedse bussen in plaats van de Whispers in Apeldoorn.

Voor de opschaling van de techniek is nu een overeenkomst gesloten met Ziehl-Abegg om 'The Wheel' te gaan produceren. Waaronder door busfabrikant VDL wordt overwogen hybride bussen gebaseerd op de techniek uit de Whisper op de markt te brengen.



Bijlage A Overzicht projecten



Project partners	Regio Twente, gemeente Enschede, Connexion, VDL	Samenwerkingsverband Regio Eindhoven, gemeente Eindhoven, Hermes, PDE Automotive, Rolande LNG, NONOX Gas Engines	Stadsregio Amsterdam, gemeente Amsterdam, GVB, VDL	Stadsregio Rotterdam, RET, RCI, stichting NEMS, VDL, e-Traction	Provincie Gelderland, Veolia, stichting The Whisper, e-Traction	Provincie Zuid-Holland, Connexion, Van Hool	Stadsregio Rotterdam, RET, Evobus, Mercedes-Benz
Locatie	Enschede	Eindhoven	Amsterdam	Rotterdam	Apeldoorn	Leiden, Gouda, Alphen a/d Rijn	Rotterdam
Type project	Alfa	Alfa	Alfa	Alfa	Bèta	Bèta	Bèta
Looptijd monitoring proefproject	Januari 2010-juni 2013	April 2013-medio 2014	Januari 2012-januari 2014	Januari 2011-december 2012	Januari 2010-februari 2012	November 2009-november 2011	April 2010-december 2012
Aantal bussen	2	2	2	2	4	4	2 (18 m)
Aandrijflijn	Seriehybride	Conventioneel, gasmotor met nagenoeg smoorvrije vermogensregeling	Brandstofcelseriehybride	Seriehybride	Seriehybride	Serie Hybride	Seriehybride
Energiedrager	Diesel	LNG/LBG	Waterstof	Diesel en elektriciteit	Diesel en elektriciteit	Diesel	Diesel
Elektromotoren	1x op differentieel	-	1x op differentieel	2 direct-drive naafmotoren (zonder naafreductie)	2 direct-drive naafmotoren (zonder naafreductie)	2x (parallel) op differentieel	4 naafmotoren (met naafreductie)
Energieopslag	Ultracaps	-	Accu en ultracaps	Accu	Accu	Ultracaps	Accu
Plug-in	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja	Nee	Nee