



Pilotprojecten innovatieve bussen

Monitoring e-Bus in Rotterdam

Rapport
Delft, april 2014

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



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

L.C. (Eelco) Eelco den Boer (CE Delft), A.H. (Anouk) van Grinsven (CE Delft),

A. (Age) van der Mei (Duinn)

Pilotprojecten innovatieve bussen

Monitoring e-Busz in Rotterdam

Delft, CE Delft, april 2014

Openbaar vervoer / Autobussen / Innovatie / Elektrisch / Motorbrandstoffen / Monitoring

Publicatienummer: 13.4827.04b.

Opdrachtgever: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

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 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 e-Busz in Rotterdam	9
2.1	Introductie	9
2.2	Busgegevens	10
2.3	Inzet in de dienstregeling	11
2.4	Brandstof- en elektriciteitsverbruik	14
2.5	CO ₂ -emissies	16
2.6	Gebruikerservaringen	17
2.7	Onderhoud	18
3	Conclusie en toekomst-verwachtingen	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 e-Busz bussen in Rotterdam.

1.2 Alfa- en bètaprojecten

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

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 smoor-vrije gasmotor	LNG/LBG	-	-	Nee
Amsterdam	2	Brandstofcel-seriehybride	Waterstof	1 centraal geplaatste elektromotor	Accu en ultracaps	Nee
Rotterdam	2	Seriehybride	Diesel	2 naafmotoren (zonder eindreductie)	Accu	Ja
Bètaprojecten						
Apeldoorn	4	Seriehybride	Diesel	2 naafmotoren (zonder eindreductie)	Accu	Ja
Leiden, Gouda, Alphen a/d Rijn	4	Seriehybride	Diesel	2 centraal geplaatste elektromotoren	Ultracaps	Nee
Rotterdam	2	Seriehybride	Diesel	4 naafmotoren (met eindreductie)	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 e-Bus in Rotterdam

2.1 Introductie

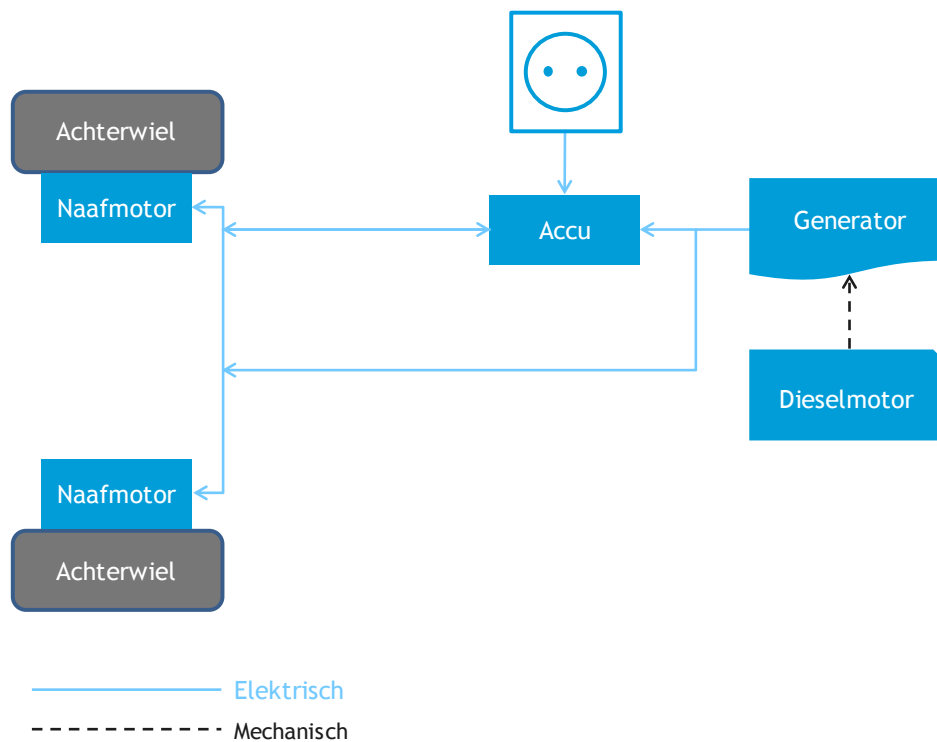
Het NEMS-project¹ rond de e-Bus is een initiatief van Hogeschool Rotterdam, e-Traction en Deltalinqs. Naast deze drie initiatiefnemers zijn de RET, VDL en TSN als partners betrokken. De twee bussen betreffen nieuwe VDL Citea bussen met een door e-Traction ontwikkelde aandrijflijn.

Het initiatief werd financieel ondersteund door het Rijk, de Stadsregio Rotterdam, het Rotterdam Climate Initiative (RCI) en VDL. Het doel van het project is het testen van twee bussen met zogenaamde Direct Drive naafmotoren in de dienstregeling van de RET.

Beschrijving van de techniek

In Figuur 1 is een schematische weergave van de aandrijving weergegeven. De achterwielen worden elektrisch aangedreven door Direct Drive naafmotoren. De bijzonderheid van deze naafmotoren is dat in feite het wiel zelf onderdeel is van de elektromotor. 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 hiervoor de meest energiezuinige strategie. Met behulp van GPS kan het managementsysteem bovendien rekening houden met de wens om in bepaalde gebieden emissievrij te rijden, bijvoorbeeld in het centrum van Rotterdam.

Figuur 1 Schematische weergave aandrijflijn hybride bussen (plug-in hybride met naafmotoren)



¹ Nieuwe Energiezuinige en Milieuvriendelijke Stadsbus.

2.2 Busgegevens

In Tabel 2 zijn de belangrijkste kenmerken van de bussen gegeven. Deze gegevens zijn relevant, omdat ze de mate van hybridisering weergeven of op een andere manier van invloed zijn op het brandstofverbruik van de bussen.

Tabel 2 Busgegevens van de e-Busz

Categorie		Waarde	Eenheid
Voertuig	Aantal bussen	2	
	Leeggewicht	13.245	kg
	Lengte	12	m
	Aantal zitplaatsen/staanplaatsen	33/41	
	Leverancier	VDL	
	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	340	Nm bij 1.600 rpm
	Motorinhoud (slagvolume)	3,0	l
	Euronorm	Euro-V	
	Generator	Maximaal vermogen	55
Brandstoftank	Inhoud	250	l
Uitlaatgasbehandeling	Roetfilter	Ja	
	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 60	kW
	Maximaal koppel	2 x 6.500	Nm
Batterij	Type	Lithium-ion ijzerfosfaat	
	Energie-inhoud	106	kWh
	Maximaal vermogen	212	kW
	Gewicht	1.152	kg
Klimaatcontrole	Airco type	Chauffeursairco	
	Vermogen airconditioning	5	kW
	Verwarming type	Webasto	
	Vermogen verwarming	30	kW



2.3 Inzet in de dienstregeling

Beide bussen zijn zowel in 2011 als in 2012 in de dienstregeling ingezet. Over 2011 zijn echter door verschillende oorzaken geen monitoringsgegevens beschikbaar. Deze rapportage bevat daarom een analyse van de monitoringsgegevens over het kalenderjaar 2012.

De inzet van de bussen hing aan de ene kant af van de technische problemen, al dan niet gerelateerd aan de innovatieve technologie. Aan de andere kant speelde de inzet door de RET een rol.

Inzet in het concessiegebied

Naast de specifieke eigenschappen van de bus bepaalt ook de inzet in het concessiegebied het brandstofverbruik. In Tabel 3 zijn gegevens van de buslijnen opgenomen waarop de e-Busz is ingezet. Ter illustratie van de ritkarakteristiek zijn het aantal stops per kilometer en de gemiddelde snelheid toegevoegd.

Tabel 3 Inzet in concessiegebied Rotterdam

Buslijn	Lengte buslijn (km)	Aantal haltes	Aantal verkeerslichten	Aantal haltes + verkeerslichten per km*	Aandeel traject binnen bebouwde kom (%)	Aantal hellingen in traject	Nominale ritduur (gepland binnen dienstregeling) (hh:mm)	Gemiddelde snelheid (km/h)
44	4,1	10	6	3,9	100	2 (Maas-tunnel)	0:15	16,4
46	6,4	15	14	3,0	100	4 (Maas-tunnel, Zuidplein)	0:20	19,2
48	6,0	13	n.b.	2,2	100	n.b.	0:28	12,9
66	11,4	20	n.b.	1,8	100	n.b.	0:45	15,2
67	4,7	13	n.b.	2,8	100	n.b.	0:17	16,6
69	10,6	21	n.b.	2,0	100	n.b.	0:35	18,2
70	9,2	20	n.b.	2,2	100	n.b.	0:30	18,4
71	7,6	11	n.b.	1,4	100	n.b.	0:18	25,3
72	7,3	13	n.b.	1,8	100	n.b.	0:20	21,9
73	3,1	12	n.b.	3,9	100	n.b.	0:12	15,5
76	9,7	22	n.b.	2,3	100	n.b.	0:36	16,2
77	7,4	18	n.b.	2,4	100	n.b.	0:34	13,1
78	8,6	18	n.b.	2,1	100	n.b.	0:24	21,5
79	13,0	15	n.b.	1,2	100	n.b.	0:22	35,5
80	5,2	12	n.b.	2,3	100	n.b.	0:20	15,6

* Wanneer het aantal verkeerslichten niet bekend is staat het getal in deze kolom voor het aantal haltes per kilometer.

Inzet gedurende de monitoringsperiode

Gemiddeld worden bussen bij de RET zes dagen per week gedurende de gehele dienstregeling ingezet en leggen deze gemiddeld een afstand van 210 km per dag af. Dit komt neer op ruim 1.200 km per week. Op jaarbasis legt een conventionele bus in de vloot van de RET ongeveer 57.000 km af. In het weekend rijdt slechts 50% van de bussen in de dienstregeling. Elke bus kent



dus één dag per week stilstand met de mogelijkheid voor onderhoud. Bij de RET krijgen chauffeurs bussen toegewezen. Dit betekent dat de inzet van een bus al bij de planning wordt bepaald. Door de beperkte groep opgeleide chauffeurs en de terughoudendheid bij het inplannen werden de e-Buszen meestal één tot twee diensten ingezet, terwijl conventionele bussen drie diensten per dag rijden.

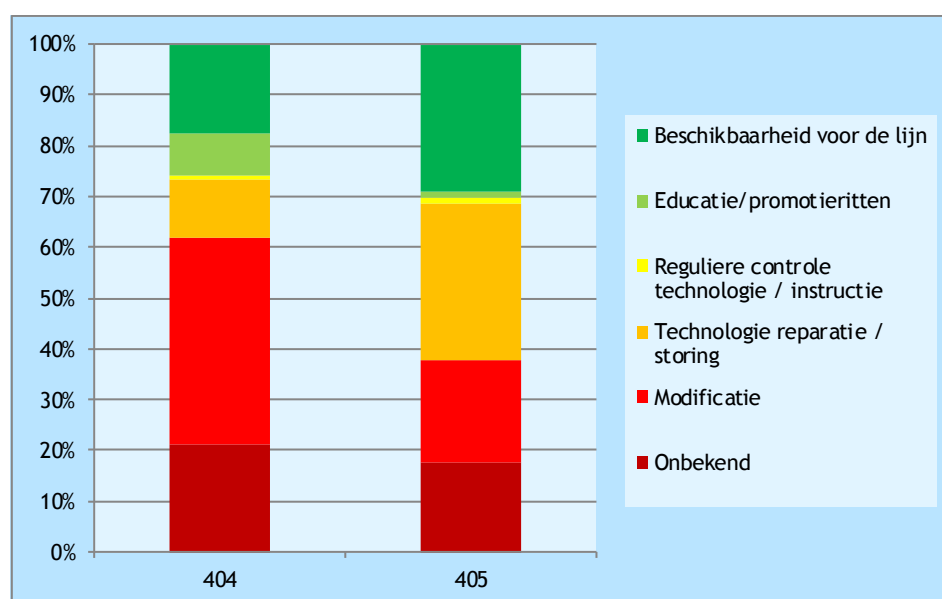
De volgende figuren en tabellen geven inzicht in de inzet van de twee bussen. Beide bussen (404 en 405) zijn onregelmatig ingezet: het kwam vaak voor dat een aantal dagen inzet gevolgd werd door een aantal dagen stilstand. Tabel 4 geeft een meer gedetailleerd overzicht van de inzet van de bussen in aantal dagen en de gemiddelde inzet. Zoals te zien is, is de inzet van beide bussen in de dienstregeling beperkt geweest, waarbij bus 404 65 dagen in de dienstregeling reed en 405 100 dagen in het jaar 2012. Het verschil in inzet kan vooral verklaard worden door de verschillen in het eerste kwartaal: bus 404 heeft het eerste kwartaal van 2012 volledig stilgestaan door brand-schade aan de generator als gevolg van een brand veroorzaakt door de startmotor.

Tabel 4 Inzet in de dienstregeling in aantal dagen 2012

	404	405
Totaal aantal dagen ingezet tijdens monitoringsperiode	65	100
Gemiddeld aantal dagen gereden per maand	5,4	8,3
Gemiddeld aantal uur gereden per maand	32,2	42,2
Gemiddeld aantal uur per dag indien bus rijdt	6	5,1

Er zijn verschillende oorzaken waarom de hybride bussen niet alle dagen zijn ingezet. Figuur 2 geeft een overzicht van de oorzaken genoemd in het monitoringsformat en het aantal dagen waarop hierdoor niet in dienstregeling gereden is.

Figuur 2 Overzicht inzetbaarheid over 2012 (100% = 365 dagen)



Veruit de meeste stilstanddagen waren gerelateerd aan gepland dan wel ongepland onderhoud. Dit grote aantal dagen kan enerzijds verklaard worden door het grote aantal storingen, maar ook de beperkte service die de e-Traction organisatie (bijv. voorraad onderdelen) heeft kunnen leveren, heeft hierbij een rol gespeeld. Tot slot noemen we ook nog het onderzoeksmatige karakter van het project dat naar voren is gekomen in een groot aantal software- en hardwarematige verbeteringen. Voor meer details over het onderhoud zie ook Paragraaf 2.7.

Opvallend is ook het aantal dagen waarop de bussen wel beschikbaar waren, maar niet waren ingedeeld in de dienstregeling. Een verklaring hiervoor is het feit dat de bussen niet tijdens weekenddagen werden ingezet vanwege de beschikbaarheid van de opgeleide groep chauffeurs, die op de bussen reden. In de categorie 'overig' vallen de dagen waarvan onbekend is waarom er niet is gereden (de registratie ervan ontbreekt).

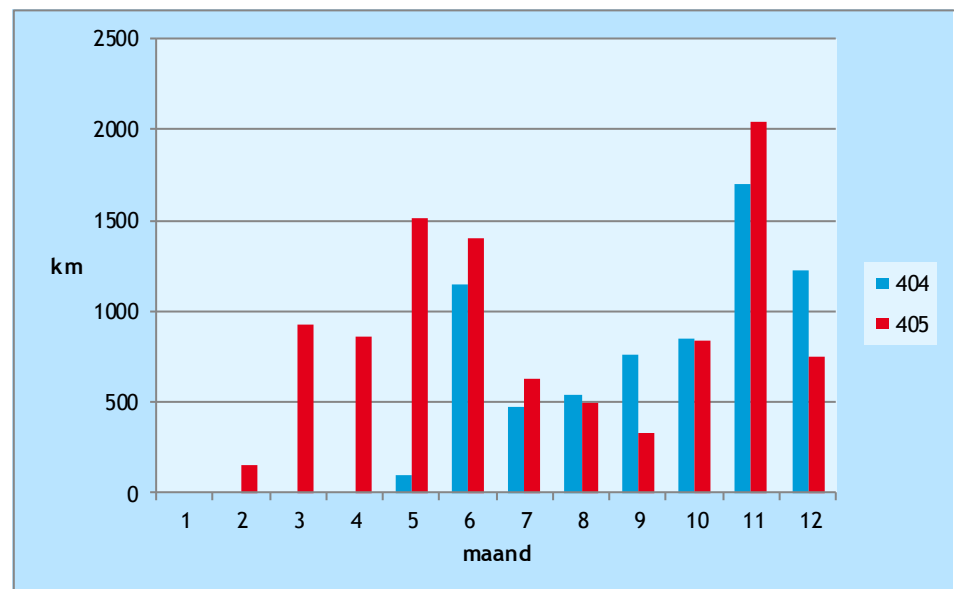
Bezetting

Aan de hand van telcijfers van het aantal reizigers is de gemiddelde bezetting in kaart gebracht. Over de gehele monitoringsperiode was de gemiddelde bezetting van bus 404 10 personen en van bus 405 9 personen. Er is geen sprake geweest van een structurele daling of stijging gedurende de monitoringsperiode.

Kilometrage

De afgelegde afstand varieerde sterk over de maanden, zoals is weergegeven in Figuur 3. Zo zijn er maanden geweest waarbij de bussen niet gereden hebben (januari 2012 door een modificatie van de generator en de al eerder genoemde brandschade). Aan de andere kant hebben beide bussen meer dan 1.500 km gereden in november 2012. Ondanks dit relatief hoge kilometrage aan het eind van 2012 is er geen duidelijke trend over 2012 zichtbaar.

Figuur 3 Totaal aantal afgelegde kilometers per bus per maand in 2012



Noot: Een gemiddelde RET-bus rijdt per maand 4.750 km.

In totaal heeft bus 404 in 2012 bijna 7.000 kilometer afgelegd en bus 405 bijna 10.000 km, waarbij een deel buiten de dienstregeling is afgelegd. 81% van alle kilometers van bus 404 is binnen de dienstregeling afgelegd. Bij bus 405 ligt dit op 92%. Het rijden buiten de dienstregeling bestond uit promotieritten, testritten en de ritten van en naar e-Traction in het geval van onderhoud.

Bus 404 heeft tussen 1 januari en 15 september 2013 6.000 kilometer gereden. Bus 405 heeft in 2013 nauwelijks gereden. Dit betekent dat ook in 2013 geen toenemende trend in de inzet van de bussen is waar te nemen. De RET meldt echter een toenemende inzetbaarheid van bus 404 sinds maart 2013 als gevolg van een modificatie.

Tijdens de monitoringsperiode zijn tevens experimenten gedaan met het elektrisch inzetten van de e-Busz. In de maand november kwam dit voor bus 404 neer op 174 km, gelijk aan 10% van de gereden kilometers in die maand. In het geval van bus 405 is 16% elektrisch afgelegd wat neerkomt op 336 kilometer. In de overige maanden van de monitoringsperiode lag dit aandeel elektrisch rijden lager, maar het exacte percentage is onbekend. Het verhogen van het aandeel elektrisch rijden is van belang om de CO₂-uitstoot te minimaliseren.

2.4 Brandstof- en elektriciteitsverbruik

Tijdens de monitoringsperiode is de hoeveelheid getankte brandstof en geladen elektriciteit gemonitord, inclusief het gebruik van airco en standkachel, evenals de kilometerstanden. In Tabel 5 is het brandstofverbruik weergegeven. Dat is berekend op basis van het totaal aantal gereden kilometers, het totale dieserverbruik en totale elektriciteitsverbruik (afgenomen aan de laadpaal). We merken op dat dit brandstofverbruik is bepaald over alle gereden kilometers tijdens de monitoringsperiode. Dit betekent dat het deel van de kilometers dat buiten de dienstregeling en buiten het concessiegebied is gereden is meegeteld.

Tabel 5 Gemiddeld brandstof- en elektriciteitsverbruik over de hele monitoringsperiode (2012)

	404	405
Totaal aantal kilometer	6.801	9.934
Totaal getankte brandstof (l, diesel)	1.613	1.933
Totaal geladen elektriciteit (kWh)	6.894	10.573
Dieserverbruik (l/100 km)	23,7	19,5
Elektriciteitsverbruik (kWh/100 km)	101,4	106,4

Op basis van gemonitorde gegevens over het gebruik van standkachel en airco, kan ongeveer 10% van het brandstofverbruik aan klimaatbeheersing toegerekend worden².

² Hierbij is gerekend met een dieserverbruik van de standkachel van 5 liter per draaiuur en een elektriciteitsverbruik van de airco, van 5 kWh per draaiuur. De draaiuren zijn geregistreerd tijdens de monitoring.



Vergelijk e-Bus met referentiebus

Om een correcte vergelijking tussen het brandstofverbruik van dieselbussen en plug-in hybride bussen te maken dient een vergelijking van de totale energieketen gemaakt te worden (well-to-wheel³). Om het toekomstpotentieel van een (plug-in) elektrische bus naar voren te laten komen, hebben we naast de huidige energiemix, ook duurzaam opgewekte elektriciteit in ogenschouw genomen.

De RET heeft het referentieverbruik van vergelijkbare conventionele bussen vastgesteld op 42,6 liter per 100 km⁴. Dit verbruik is gebaseerd op alle 12 meter Mercedes Benz Citaro bussen (serie B200 en B300) van de RET.

In Tabel 6 is een vergelijking gemaakt tussen het primair fossiel energiegebruik van de referentiebus, en de e-Bus 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%,⁵ en op basis van 3,6 MJ per kWh elektriciteit met een productierendement van 49,6%. De hoeveelheid fossiele primaire energie benodigd bij het produceren van elektriciteit uit zon en wind is nihil.

Tabel 6 Primair fossiel energiegebruik e-Bus bussen t.o.v. referentie

Referentie	Diesel (l/100 km)	Elektriciteit (kWh/100 km)	Totaal primair fossiel energiegebruik (MJ/km)
Referentiebus	42,6	n.v.t.	18,9
404			
Diesel+ huidige elektriciteitsmix	23,7	101,4	17,9
Diesel + elektriciteit o.b.v. zon en wind	23,7	101,4	10,5
405			
Diesel+ huidige elektriciteitsmix	19,5	106,4	16,4
Diesel + elektriciteit o.b.v. zon en wind	19,5	106,4	8,7

Uit Tabel 6 blijkt dat het primair fossiel energiegebruik in het geval van het gebruik van duurzaam opgewekte energie significant lager is (52-54%) dan dat van de referentiebus of de e-Bus bij gebruik van de huidige elektriciteitsmix. In de huidige situatie is fossiel primair energiegebruik van de e-Bus tussen 5 en 13% lager.

³ 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.

⁴ Een tweelingtest met een conventionele VDL Citea bus is niet uitgevoerd.

⁵ 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.



2.5 CO₂-emissies

De 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 7.

Tabel 7 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: SKAO⁶.

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 elektriciteitsmix⁷ van grijze en groene energie in de komende decennia verder wordt vergroend.

In Tabel 8 is de CO₂-uitstoot van de bussen weergegeven, voor verschillende elektriciteitsmixen. Bus 405 stoot per km gemiddeld minder CO₂ uit dan bus 404. Dit kan mede verklaard worden door een relatief hoger aantal 'elektrische' kilometers, zie Tabel 5.

Tabel 8 Gemiddelde CO₂-uitstoot per km per bus

Bus	Huidige elektriciteitsmix	Wind-of zonne-energie
	gCO ₂ -eq./km	gCO ₂ -eq./km
404	1.205	759
405	1.094	626

Vergelijk e-Busz met referentiebus

In Tabel 9 is de CO₂-reductie ten opzichte van de referentie weergegeven in percentages, ook inclusief airo en standkachel.

⁶ http://www.milieubarometer.nl/uploads/files/Lijst_emissiefactoren_SKAO_Connekt_Stimular.pdf.

⁷ Alhoewel de e-Busz 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.



Tabel 9 Reductie in CO₂-uitstoot ten opzichte van referentie

Bus	g CO ₂ -eq./km (wind/zon- huidige elektriciteitsmix)	Reductie t.o.v. referentiebus (huidige elektriciteitsmix)	Reductie t.o.v. referentiebus (wind- of zonne- energie)
Referentie (diesel)	1.335	-	-
404	759-1.205	9,8%	43,2%
405	626-1.094	18,1%	53,1%
Gemiddelde beide bussen	680-1.139	14,7%	49,1%

Tabel 9 laat duidelijk zien 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 e-Busz af ten opzichte van een conventionele bus⁸. In het geval van elektriciteit op basis van windenergie of waterkracht kan zelfs 50% CO₂ gereduceerd worden. Naast CO₂-reductie als gevolg van minder CO₂-intensieve energiebronnen wordt ook CO₂ gereduceerd door de efficiëntere aandrijving van de e-Busz.

2.6 Gebruikerservaringen

2.6.1 Reizigers

De passagiersenquête is in november en december 2012 gehouden tijdens zowel de volledig elektrische als de hybride dienstritten.

Ten aanzien van rijgedrag en comfort wordt er in eerste instantie weinig verschil opgemerkt door de reizigers. Als ze worden geattendeerd op het feit dat ze in een elektrische bus zitten worden ze zich er pas van bewust dat deze relatief stil is en comfortabel rijdt.

Het algehele beeld is dat reizigers wel iets over de e-Busz weten door de bestickering van de buitenkant van de bus of via mond-tot-mond reclame, maar ze weten niet precies wat het inhoudt. De reizigers zijn wel positief over het toepassen van milieuvriendelijke bussen en het feit dat de RET zich bezighoudt met verduurzaming.

2.6.2 Chauffeurs

Voor de e-Busz is een tiental chauffeurs geselecteerd om met de bus te rijden, om de rijfrequentie hoog te houden en daardoor de chauffeurs goed te laten wennen aan de techniek en de rijstijl. Tijdens de volledig elektrische dienstregeling in november 2012 zijn er enquêtes afgenomen onder zes chauffeurs. De algehele conclusie is dat bijna elke chauffeur met plezier en gepaste trots op de e-Busz heeft gereden. De bus wordt door de chauffeurs als zeer prettig ervaren door de traploze aandrijving en het comfortabele rijgedrag. Het wordt jammer gevonden dat de bus, door technische problemen, beperkt beschikbaar is.

⁸ Bij het gebruik van tweede generatie biobrandstoffen kunnen ook de CO₂-emissies van de referentiebus omlaag worden gebracht. Echter de beschikbaarheid van deze brandstoffen is naar verwachting beperkt, zoals o.a. wordt gesteld in 'Timing of technology roll-out for climate targets in transport' (ECN, 2011).



De conclusie uit de chauffeursenquête is dat er meer op- en aanmerkingen waren aan de opbouw van de bus zelf, dan op het innovatieve aandrijfsysteem. Deze op- en aanmerkingen liepen uiteen van de ongelijke hoogte van beide buitenspiegels tot het missen van een bekerhouder.

De op- en aanmerkingen over het aandrijfsysteem beslaan voornamelijk het omgaan met de bus voor en na de dienstregeling. Zo moeten de chauffeurs bij het laden een handeling verrichten om te zorgen dat er monitoringsgegevens verzameld worden. Dit is nu te omslachtig, maar valt ook weg zodra de monitoring stopt, zodat het opladen van de e-Busz eenvoudiger wordt. Een ander benoemd nadeel is het licht storende bromgeluid als de dieselmotor draait.

Verder zijn er opmerkingen gemaakt over de communicatie en instructie over de e-Busz; deze had uitgebreider moeten zijn. Het bedieningsgemak is daarnaast als makkelijk beoordeeld door het gros van de chauffeurs.

2.6.3 Monteurs

De e-Buszen worden enkel geëxploiteerd door RET, het onderhoud en reparaties wordt door e-Traction gedaan. Hierdoor hebben RET-monteurs nog weinig te maken gehad met de techniek in de e-Busz. Het onderhoud en de modificaties zijn grotendeels verricht door e-Traction. Daarnaast loste e-Traction ook de meeste kleine storingen zelf op. Om deze reden is er besloten geen enquête te houden onder de monteurs, aangezien de monteurs van de RET niet aan de hybride techniek gewerkt hebben.

2.7 Onderhoud

Door de vele betrokken partijen bij de technologie was het niet altijd voldoende duidelijk welke partij (RET, VDL of e-Traction) verantwoordelijk was voor het onderhoud, bijvoorbeeld bij routinematig onderhoud als olie verversen.

Omdat het onderhoud voornamelijk plaatsvond bij e-Traction betekende dit ook dat de bussen vaak van Rotterdam naar e-Traction in Apeldoorn gereden moesten worden, wat ook zorgde voor langere uitval uit de dienstregeling. e-Traction is een ontwikkelingsbedrijf met beperkte capaciteit in de werkplaats en beperkte voorraad aan onderdelen. Hierdoor kan het onderhoud niet vergeleken worden met onderhoud uitgevoerd door grote OEM's.

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.

Regulier onderhoud

Een factor, die bij het regulier onderhoud voor meer stilstanddagen zorgde, was het feit dat de RET geen andere VDL-bussen in de vloot heeft.

Dit betekent dat reguliere onderdelen niet standaard op voorraad waren en VDL regelmatig ingeschakeld moest worden vanwege de onbekendheid met de VDL-bussen. Hierdoor nam het regulier onderhoud meer tijd in beslag dan bij de andere bussen in de vloot. Een deel van het onderhoud aan de reguliere technologie is ook door VDL uitgevoerd.



Modificaties

Omdat de toepassing van de technologie aanvankelijk nog in de kinderschoenen stond, bestond een gedeelte van de onderhoudswerkzaamheden uit het doorontwikkelen en optimaliseren van de technologie (bijv. door het doorvoeren van software updates). Vaak werden modificaties gecombineerd met reguliere reparaties. Met name in de eerste maanden van 2012 zijn grote modificaties doorgevoerd. Zo is eind 2011/begin 2012 één van de bussen door brandschade in de generatorkast uitgevallen. Toen is meteen bij beide bussen een revisie van de generatorset uitgevoerd en een ander type compressor toegevoegd om de bussen stiller, efficiënter, betrouwbaarder en veiliger te maken. Ook is later in 2012 een software-update doorgevoerd toen de lijnfilm gerepareerd moest worden.

Reparaties/storingen gerelateerd aan de hybride technologie

Het opsporen van de oorzaken van storingen neemt nu nog veel tijd in beslag wegens de onbekendheid met de hybride technologie. Een deel van de storingen werd veroorzaakt door de kwaliteit van ingebouwde onderdelen en de mate van integratie in het al bestaande VDL-busconcept. Door het niet-verkrijgbaar zijn van de juiste, voor automotive⁹ ontworpen, componenten waren veel onderdelen nog prototypen. Dit betekende dat er soms ook nieuwe prototypen gemaakt moesten worden wanneer onderdelen moesten worden vervangen. Het niet op voorraad zijn van deze onderdelen zorgde hierdoor voor langere stilstand van de bus. De verwachting is dat downtime door het wachten op onderdelen in de toekomst afneemt naarmate de technologie gangbaarder wordt.

Opvallend is dat er zich tijdens 2012 weinig storingen hebben voorgedaan bij de wielnaafmotoren. Storingen werden vooral veroorzaakt door storingen in componenten zoals stekerverbindingen of de generatorset.

Naast in de componenten zelf deden zich ook storingen voor in de software, die de verschillende onderdelen met elkaar laat communiceren.

⁹ Automotive componenten zijn ontworpen voor dynamische gebruik in een stadsbus, waarbij de onderdelen kunnen worden blootgesteld aan bijvoorbeeld trillingen en wisselende belastingen.





3 Conclusie en toekomstverwachtingen

Conform wat verwacht mag worden van een alfa-project is de inzetbaarheid van de e-Bus beperkt geweest. Het concept is op dit moment nog niet marktrijp, maar gedurende de proef is de potentiële vermindering van het brandstofverbruik en de (WTW) CO₂-emissie aangetoond, en zijn er verschillende componenten in de bus vervangen door kwalitatief hoogwaardigere alternatieven, met name begin 2013.

Ondanks de beperkte inzetbaarheid en nog lage betrouwbaarheid van de e-Bus zijn de verschillende betrokken partijen positief over het concept en de toekomstverwachting. De partijen zijn positief over de leercurve en de testen met volledig elektrisch rijden tijdens de monitoringsperiode hebben veel inzicht gegeven in het potentieel van de bus.

Technische verbeteringen

Gedurende de hele monitoringsperiode is al gewerkt aan optimalisatie van de bussen, maar aan het einde van de monitoringsperiode zien e-Traction en andere partijen nog altijd mogelijkheden voor verdere verbeteringen en dus het nog beter benutten van het potentieel. Een aantal van de technische verbeterpunten voor de toekomst zijn:

- verder optimaliseren van het gebruik van de accucapaciteit;
- automatisch laden met meer efficiëntere DC-laders of via andere innovatieve laadinfrastructuur;
- verder optimaliseren van het regeneratief remmen;
- Optimalisatie van koeling en verwarming van de e-Bus.

Door deze technische verbeteringen zal het totale energieverbruik van de bus kunnen dalen en zal het aandeel elektriciteit verder kunnen toenemen, waardoor het energiegebruik per kilometer verder afneemt.

De huidige e-Buszen waren typische prototypes. Wanneer de bussen op grotere schaal geproduceerd gaan worden vallen de nadelen die te maken hebben met de complexiteit van een omgebouwde bus, in combinatie met een nieuw ontwikkelde elektrische aandrijving, weg.

Operationele verbeteringen

Naast het technisch potentieel is de verwachting dat de nadelige operationele factoren, die nu de inzet van de bussen hebben belemmerd, zullen verdwijnen. Een voorbeeld hiervan is de beschikbaarheid van chauffeurs. Binnen de monitoringsperiode reed maar een beperkte groep chauffeurs op de bussen. In de toekomst zullen naar verwachting alle chauffeurs van een vervoerder op deze bussen gaan rijden. Wanneer de betrouwbaarheid toeneemt zal de planningsafdeling de bussen structureler kunnen inplannen. Daarnaast zal het serviceniveau toenemen als de productie en onderhoudservice uitgevoerd zullen worden door commerciële OEM's.



Vervolgstappen na de pilotperiode

De inzet van deze bussen is na afloop van de monitoringsperiode niet gestopt. Na een verdere doorontwikkeling en optimalisatie bij e-Traction zullen de twee e-Buszen terugkeren in de dienstregeling van de RET. Dan zal vooral gekeken worden naar het verbeteren van de inzetbaarheid en de betrouwbaarheid. Daarnaast zal er volgens de standaard SORT-methodiek meer inzicht gegeven worden in het energieverbruik.

Mede door dit pilotproject en de demonstraties van de e-Bus heeft de samenwerking tussen VDL en stichting NEMS geleid tot de eerste volledig elektrische stadsbus van VDL, de Citea Electric. Daaraan voorafgaand had het Duitse bedrijf Ziehl-Abegg in 2011 een licentie voor de productie en verkoop van de wielnaafmotor genomen. Ziehl-Abegg levert de wielnaafmotoren voor de Citea Electric.

Over het algemeen is de conclusie op basis van deze concrete ontwikkelingen dus dat de sector op basis van de in deze rapportage beschreven ervaring gelooft in het concept van de wielnaafmotor, maar dat de ontwikkeling van een operationeel inzetbare bus nog de nodige tijd en investering vergt.



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

