

Pilotprojecten innovatieve bussen

Monitoring Hybride Brandstofcelbussen GVB Amsterdam

Rapport
Delft, mei 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), Anouk van Grinsven (CE Delft),

Age van der Mei (Duinn), M. (Marcel) Brouwer (Duinn)

Pilotprojecten innovatieve bussen

Monitoring Hybride Brandstofcelbussen GVB Amsterdam

Delft, CE Delft, mei 2015

Openbaar vervoer / Autobussen / Brandstoffen / Innovatie / Technologie / Evaluatie

VT: Pilotproject

Publicatienummer: 15.4827.38

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

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 project ‘Hybride Brandstofcelbussen’	9
2.1	Introductie	9
2.2	Busgegevens	10
2.3	Inzet in de dienstregeling	11
2.4	Brandstofverbruik	14
2.5	Onderhoud	16
3	Conclusie en toekomstverwachting	19
Bijlage A	Overzicht projecten	21





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 het pilotproject met de hybride brandstofcelbussen in Amsterdam.

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 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 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 elektromotoren	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 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 dit 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 project 'Hybride Brandstofcelbussen'

2.1 Introductie

In opdracht van het Gemeentelijk Vervoersbedrijf Amsterdam (hierna GVB) en het vervoersbedrijf RVK in Keulen (Duitsland) heeft Advanced Public Transport Systems BV te Helmond (hierna APTS), onderdeel van de VDL Groep, vier gelede 18,5-meter brandstofcelhybridebussen gebouwd van het type Phileas.

Twee bussen werden ingezet in het pilotproject in Amsterdam, en twee in een soortgelijk project in Keulen.

Het is voor het GVB het tweede waterstofproject. In het kader van het CUTE-project dat in 2008 is afgerond heeft het GVB vier jaar met drie 12-meter Mercedes Citea-brandstofcelbussen gereden.

Het huidige project is gestart op 1 januari 2012 en vanaf 30 januari 2012 zijn beide bussen ingezet op lijn 22 in de dienstregeling. Het projectplan besloeg de periode van 1 januari 2012 tot 31 december 2013. Na afronding van de formele monitoringsperiode zijn de bussen in de dienstregeling blijven rijden.

De informatie in deze rapportage is gebaseerd op de monitoringsdata van januari 2012 tot en met het eerste kwartaal van 2014, zoals bijgehouden en aangeleverd door het GVB.

Beschrijving van de techniek

De waterstofbus van APTS heeft een brandstofcel seriehybride aandrijflijn met twee vormen van elektriciteitsopslag: batterijen en ultracaps.

De brandstofcel zet waterstof om in elektriciteit, waarmee het batterijpakket wordt geladen. De aandrijving gebeurt op de achterste as door een centraal geplaatste elektromotor, die via een vertraging het differentieel aandrijft.

Tijdens het remmen fungeert de elektromotor als generator, waarbij de kinetische energie wordt omgezet in elektrische energie en wordt opgeslagen in de ultracaps. Wanneer de daarin opgeslagen elektriciteit niet wordt ingezet voor het accelereren wordt die geleidelijk overgeladen naar de batterijen. Het energiemanagementsysteem zorgt in dit geheel voor de meest energie-zuinige strategie.

Het idee achter het gebruiken van zowel ultracaps als batterijen is dat ultracaps voor korte tijd een groot vermogen kunnen opnemen of afgeven (wat goed past bij remmen respectievelijk optrekken), terwijl de opslagcapaciteit gering is. Bij batterijen is dat andersom; die kunnen relatief kleine vermogens aan, maar kunnen wel veel opslaan. De combinatie biedt in beginsel de mogelijkheid tot een optimaal ontwerp te komen.

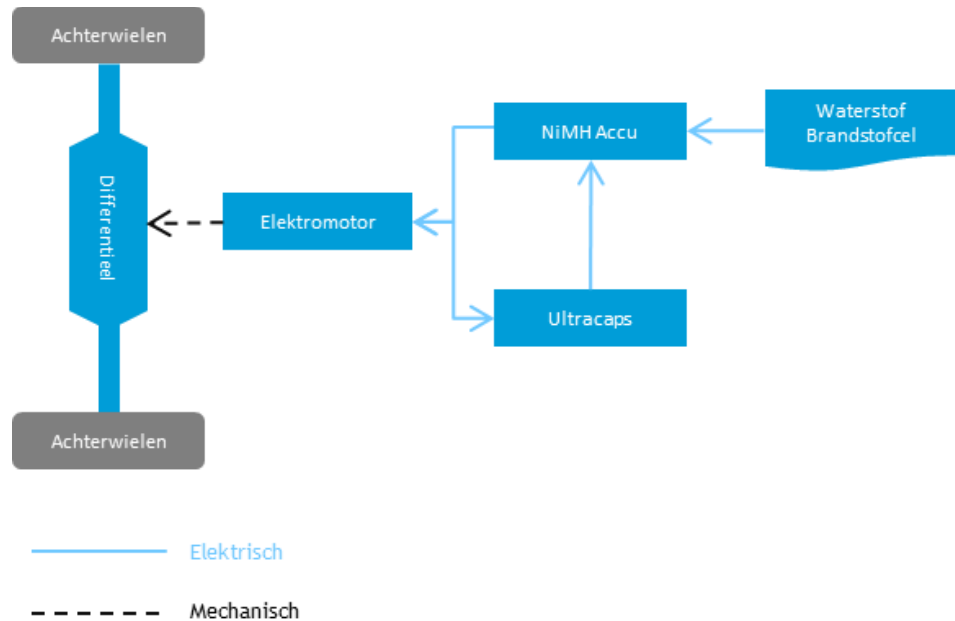
De elektriciteit voor de randapparatuur, zoals airco, OV-chipsystemen en verlichting, wordt apart opgeslagen, in twee normale 24 volt loodaccu's.



Het waterstof wordt onder een druk van 350 bar opgeslagen in 8 cilinders die op het dak van de bus zijn gemonteerd. Het aftanken duurt, afhankelijk van de restvoorraad in de bus, tot 25 minuten.

In Figuur 1 is schematisch de aandrijving weergegeven.

Figuur 1 Schematische weergave van de aandrijflijn (seriehybride, met batterij en ultracaps)



Stalling en werkplaats

Brandstofcelbussen vereisen vanwege veiligheidsaspecten een speciaal ingerichte stalling en werkplaats. Beide liggen in elkaars verlengde, en boven de baan zijn luiken in het dak gemonteerd die automatisch open gaan wanneer een waterstoflekkage wordt gedetecteerd. Verder zijn er voorzieningen die eventueel lekkend waterstof snel afzuigen. De bussen worden in de werkplaats geaard en alle elektrische apparatuur is vonkvrij uitgevoerd.

Tankinfrastructuur

De brandstofcelbussen worden getankt bij het reeds bestaande eigen vulpunt van het GVB, ook op het terrein Garage Noord. De installatie produceert waterstof door elektrolyse van water. De productiecapaciteit bedraagt 60 Nm³ waterstof per uur, waarbij het waterstof wordt opgeslagen in een bufferopslag op 400 bar.

2.2 Busgegevens

In Tabel 2 zijn de belangrijkste kenmerken van de bussen gegeven. Het gaat om twee 18,5-meter bussen van APTS uit 2011 met GVB-busnummers 007 en 008.

Tabel 2 Busgegevens van de Phileas brandstofcellussen

Categorie		Waarde	Eenheid
Voertuig	Aantal bussen	2	
	Leeggewicht	20.590	kg
	Lengte	18,44	m
	Aantal zitplaatsen	37+1 Rolstoel	
	Leverancier	APTS	
	Lage vloer	Ja	
Aandrijving	Aandrijving	Brandstofcel seriehybride	
	Regeneratief remmen	Ja	
Brandstofcel	Maximaal vermogen	150	kW
	Werktemperatuur	50-75	°C
	Gewicht	404	kg
	Euronorm	NVT	
Brandstoftank	Inhoud (volume)	8 x 205	l
	Inhoud (gewicht)	8 x 95	kg
	Druk	350	bar
Accu (Tractie)	Merk en soort	Hoppecke, NiMH	
	Energie-Inhoud	24	kWh
	Maximaal vermogen	110	kW
	Gewicht	960	kg
Elektromotor	Aantal	1 (vierpolig, asynchroon)	
	Vermogen voor tractie (piek)	N.B.	kW
	Vermogen voor tractie (continu)	240	kW
	Maximaal koppel	1800	Nm
Ultracaps	Merk	Maxwell	
	Energie-inhoud	6 x 0,1017	kWh
	Maximaal vermogen	610	kW
	Gewicht	348	kg
Klimaatcontrole	Merk Airco	Heavac	
	Vermogen airconditioning	2 x 8	kW
	Verwarming type	Zie airconditioning	
	Vermogen verwarming	Zie airconditioning	kW

2.3 Inzet in de dienstregeling

De bussen zijn vanaf 30 januari 2012 ingezet op lijn 22. De formele monitoringsperiode eindigde op 31 december 2013, maar de bussen blijven voorlopig doorrijden. Voor de monitoring is het eerste kwartaal van 2014 ook opgenomen.

Inzet in het concessiegebied

Naast de specifieke eigenschappen van de bus bepaalt ook de inzet in het concessiegebied het brandstofverbruik. De twee brandstofcellussen zijn ingezet in de stadsdienst van Amsterdam op lijn 22.

Lijn 22 loopt van Zaanstraat (Sparndammer- en Zeeheldenbuurt), via het Centraal Station naar de Th. K. Van Lohuizenlaan (Indische Buurt). De kenmerken van de gereden lijn zijn weergegeven in Tabel 3.



Tabel 3 Kenmerken lijn 22

Buslijn	Lengte buslijn (km)	Aantal haltes	Aantal verkeerslichten	Aantal* stops per kilometer	Aandeel traject binnen bebouwde kom (5)	Aandeel hellingen in traject	Nominale ritduur (gepland in dienstregeling) (hh:mm)	Gem. snelheid (km/h)
22	8,8	26	21	5,3	100%	2	0:36	14,7

Noot: 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 brandstofcelbussen rijden uitsluitend op doordeweekse dagen en voeren gezamenlijk één dienst uit. Eén bus rijdt van 06:21-11:58 in de dienstregeling en de ander van 12:02-18:37. Wanneer één van de bussen het geplande dienstdeel niet rijdt vanwege onderhoud, storingen of demonstratieritten, wordt de andere bus de hele dag ingezet. In week 52 wordt niet gereden met de bussen.

In Tabel 4 is het aantal verzorgde diensten per bus weergegeven, tussen 2 januari 2012 en 29 maart 2014.

Tabel 4 Inzet (aantal dienstdelen en percentage van geplande dienstdelen)

		007	%	008	%
2012	Q1	36	82%	9	20%
	Q2	21	33%	21	32%
	Q3	30	46%	73	113%
	Q4	50	83%	55	92%
2013	Q1	31	48%	24	38%
	Q2	63	97%	50	78%
	Q3	70	107%	45	70%
	Q4	35	58%	69	116%
2014	Q1	25	38%	16	24%
Totaal		360	65%	363	66%

Noot: Een inzetpercentage hoger dan 100% duidt erop dat er een aantal diensten van de andere bus zijn overgenomen.

Van de maximaal 1.108 te rijden dienstdelen gedurende de monitoringsperiode hebben beide bussen er gezamenlijk 723 verzorgd.

In Tabel 5 is het overzicht gegeven van de inzetbaarheid en problemen met de brandstofcelbussen als percentage van de beschikbare tijd. In totaal stonden de bussen 32% van de tijd stil door technische problemen, 4% van de tijd kon niet gereden worden door problemen met de tankinfrastructuur, 2% van de tijd kon niet gereden worden door schade, 1% van de tijd kon niet gereden worden door niet beschikbaar zijn van personeel en ten slotte is 1% van de tijd besteed aan het geven van demonstraties of bezoeken van beurzen.



Tabel 5 Inzetbaarheid, als percentage van beschikbare tijd (30 januari 2012-29 maart 2014)

Inzetbaar	Storingen	Tanken	Schade	Personeel	Demo
59%	32%	4%	2%	1%	1%

Bezetting

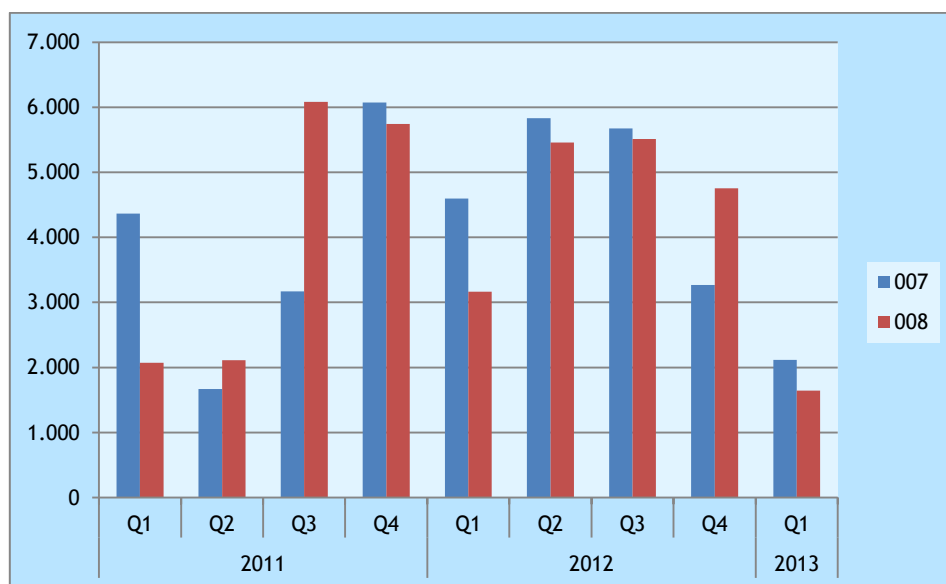
De bezetting van de brandstofcellussen op lijn 22 is niet bijgehouden of deze informatie is niet verstrekt door de projectpartijen.

Kilometrage

In Figuur 2 en Tabel 6 is het geregistreerde kilometrage per jaar weergegeven.

Aan het begin en eind van een dienst hebben beide bussen een aan- en afrijroute van 9,8 kilometer van Garage Noord naar het begin van de lijn in de Zaanstraat. Een bus op lijn 22 rijdt in een dienstdeel 70,7 km in de dienstregeling en rijdt 19,6 kilometer aan materieel kilometers, in totaal 90,3 kilometer per bus. Per week zou een bus 451,5 kilometer moeten rijden.

Figuur 2 Gereden kilometrage per bus per kwartaal (km)



De geregistreerde kilometrages zijn bepaald op basis van dagelijkse mutaties in de kilometerstand die automatisch worden bijgehouden op de stalling bij vertrek en aankomst van een bus. Dit is inclusief aan en afrijkilometers.



Tabel 6 Kilometrage per bus per kwartaal (km)

		007	008
2012	Q1	4.364	2.073
	Q2	1.670	2.111
	Q3	3.168	6.082
	Q4	6.071	5.743
2013	Q1	4.597	3.165
	Q2	5.833	5.458
	Q3	5.673	5513
	Q4	3.267	4.754
2014	Q1	2.114	1.641
Totaal		36.757	36.540

De bussen zijn los van het voorgaande ook ingezet voor demonstratieritten. Gezamenlijk hebben de bussen 1.477 kilometer gereden aan demonstraties gedurende de periode van monitoring.

2.4 Brandstofverbruik

Tanken vindt na afloop van elke dienst plaats bij terugkeer op Garage Noord. De getankte hoeveelheid waterstof wordt geregistreerd.

Het brandstofverbruik is enkel bijgehouden gedurende de periodes dat voertuigen operationeel zijn geweest, in de dienst. Door storingen of onderhoud aan voertuig- of tankinfrastructuur ontbreken voor enkele maanden de tankregistraties, dit is weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Brandstofverbruik per maand in kg/100 km

	Voertuig	007	008
2012	Januari	-	-
	Februari	16,6	17,1
	Maart	16,8	-
	April	-	-
	Mei	16,2	14,5
	Juni	16,4	13,1
	Juli	16,0	15,7
	Augustus	16,9	15,8
	September	13,8	14,0
	Oktober	14,8	15,0
	November	13,8	14,4
	December	15,9	15,7
2013	Januari	16,6	15,4
	Februari	17,2	16,4
	Maart	15,8	15,4
	April	16,2	15,4
	Mei	16,3	15,0
	Juni	14,9	15,4
	Juli	15,9	14,7
	Augustus	16,4	14,4
	September	14,8	14,5
	Oktober	15,0	14,4
	November	-	14,8
	December	18,5	15,0



	Voertuig	007	008
2014	Januari	18,0	14,6
	Februari	16,8	14,7
	Maart	-	-

Wanneer alle volledig geregistreerde tankbeurten per jaar worden gesommeerd ontstaat het volgende beeld zoals weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8 Gemiddeld brandstofverbruik in kg/100 km

	007	008	Totaal
Getankte brandstof (kg)			
2012	2.222	2.253	4.475
2013	3.083	2.848	5.931
2014	399	257	655
Totaal	5.703	5.358	11.061
Kilometrage			
2012	14.309	15.035	29.344
2013	19.363	18.962	38.325
2014	2.302	1.757	4.059
Totaal	35.974	35.754	71.728
Verbruik (kg/100 km)	15,9	15,0	15,4

Het gemiddelde brandstofverbruik bedraagt 15,4 kilogram per 100 kilometer. Om dit brandstofverbruik in perspectief te plaatsen kan het worden uitgedrukt in diesequivalenten. Waterstof heeft een energie-inhoud van 120 MJ/kg, diesel heeft een energie-inhoud van 36 MJ/liter. Dit betekent dat 15,4 kilogram waterstof het energie-equivalent heeft van 51,3 liter diesel.

Vergelijk brandstofcellbussen met referentiebus

Om te bepalen hoe brandstofcellbussen presteren ten opzichte van reguliere dieselbussen, is voor een periode van negen dagen het brandstofverbruik van standaard 18-meter gelede Mercedes Citaro EEV gemeten op lijn 22. De metingen zijn gedaan in een periode toen de brandstofcellbussen niet inzetbaar waren door uitval en de diensten overgenomen moesten worden door dieselbussen.

Het referentieverbruik is weergegeven in Tabel 9.



Tabel 9 Referentieverbruik 18-meter dieselbussen

Datum	Kilometer	Liter	Verbruik (l/100km)
23 maart 2012	164	105	64,3
26 maart 2012	132	89	67,7
27 maart 2012	163	103	62,9
28 maart 2012	171	104	60,6
6 april 2012	166	100	60,2
10 april 2012	162	96	59,1
13 april 2012	160	91	57,1
16 april 2012	164	109	66,2
19 april 2012	166	95	57,4
Totaal	1.448	892	61,6

Het referentieverbruik van een 18-meter gelede dieselbus op lijn 22 bedraagt 61,6 liter diesel per 100 kilometer. Uit het referentieverbruik blijkt dat lijn 22 een relatief zware lijn is, gegeven een meerverbruik van 12,8% ten opzichte van het gemiddelde brandstofverbruik van alle 18-meter Citaro's van het GVB in Amsterdam (54,6 liter per 100 km).

Op energiebasis heeft de seriehybride brandstofcelbus een 16,7% lager verbruik dan de referentiebussen. Dit betreft het tank-to-wheel-energieverbruik. Als de productie van waterstof en diesel worden meegenomen in de analyse is het energieverbruik hoger dan dat van een dieselbus.

Voor de productie van waterstof door elektrolyse van water wordt op dit vulpunt hernieuwbare elektriciteit gebruikt. Het vulpunt is aangelegd in 2003 voor het CUTE-project en voldoet niet aan de laatste stand van de techniek. Het productierendement bedraagt 50 tot 60%.

2.4.1 Reizigers

Gedurende de projectperiode zijn er geen gebruikservaringen van reizigers gemonitord of aangeleverd. Deze zijn wel uitgevoerd tijdens het eerdere CUTE-project, maar het GVB gaf aan daarvoor in dit project geen mankracht en budget te hebben.

2.4.2 Chauffeurs

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

2.4.3 Monteurs

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

2.5 Onderhoud

De noodzaak tot onderhoud wordt door verschillende aspecten veroorzaakt. Er wordt onderscheiden op:

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



Regulier onderhoud

Gedurende de gehele monitoringsperiode is het reguliere onderhoud uitgevoerd door het Ingenieursbureau van het GVB. Regulier onderhoud omvat o.a. het vervangen van banden, repareren van schade, reparatie van elektronica, vervangen van leidingen, etc.

Vanwege de integratie van alle elektrische systemen en randapparatuur in deze serieel-elektrisch hybride waterstofconfiguratie, is het niet altijd mogelijk om onderscheid te maken tussen regulier onderhoud en onderhoud aan de aandrijflijn.

De bussen zijn volledig door APTS ontwikkeld en gebouwd voor dit project op basis van een reeds innovatief Phileaschassis, dit maakt de voertuigen onderhoudsgevoeliger aangezien veel onderdelen zich nog niet in deze configuratie bewezen hebben in een OV-bus.

Modificaties

De voornaamste modificaties die gedurende het project zijn gedaan:

- Verbeteringen aan de isolatie van de elektrische systemen om kortsluiting of foutieve meetwaarden te voorkomen.
- Verbeteren van de koeling van de brandstofcellen, die te warm werden.
- Versteving van de wielophanging. Het extra gewicht van de aandrijving zorgt voor een zwaarder dan verwachte belasting op de wielnaven en ophanging.
- Continue verbetering van de software van het tractiemanagementsysteem.

Reparaties/storingen gerelateerd aan de waterstof en hybride technologie

Het onderhoud aan de hybride aandrijving is verzorgd door het onderhoudsbedrijf Busland (net als APTS onderdeel van de VDL-groep) en VosslohKiepe.

De voornaamste storingen aan de aandrijving komen voort uit problemen met de vele computergestuurde systemen in de bus. Zowel van de hybride systemen als van ABS, compressoren, gaspedaal, snelheidssensor en klimaat-systemen.

Het resetten van de systemen of de gehele bus verhelpt meestal de storing. Vervolgens wordt er met specialisten van APTS en VosslohKiepe gezocht naar de oorzaak. Soms kon een probleem direct worden opgelost, maar soms vergde het vinden van software-oplossingen dagen of langer.

De belangrijkste problemen met de brandstofcellen waren:

- De temperatuur; de brandstofcellen waren onvoldoende geïsoleerd voor de winterperiode, en kwamen daardoor niet op de juiste bedrijfstemperatuur. In andere perioden werden ze juist onvoldoende gekoeld en raakten oververhit.
- De belasting; niet alle brandstofcellen in de brandstofcelunit werden gelijk belast, door ongelijke waterstoftoevoerdruk.
- De isolatie van de elektrische systemen.





3 Conclusie en toekomstverwachting

In Amsterdam zijn twee gelede seriehybride brandstofcellussen twee jaar ingezet door het GVB op stadslijn 22. Deze lijn kan met een gemiddelde snelheid van 14,7 kilometer per uur worden geclassificeerd als een zware stadslijn. Gedurende de monitoringsperiode hebben de bussen gezamenlijk 73.000 kilometer gereden.

Brandstofverbruik en technische verbeteringen

Het gemeten brandstofverbruik van de bussen is redelijk constant geweest. Bus 007 heeft stelselmatig een iets hoger verbruik dan bus 008. Het is niet duidelijk wat hier de oorzaak van is.

De brandstofcellussen hebben een gemiddeld brandstofverbruik van 15,4 kg waterstof per 100 km, wat op energiebasis het equivalent is van 51,3 l/100 km diesel. Vergeleken met het referentiebrandstofverbruik van 61,6 liter diesel per 100 kilometer voor een reguliere 18-meter dieselbus op dezelfde lijn, zijn de brandstofcellussen 17% energie-efficiënter tank-to-wheel-verbruik. De productie van het waterstof door middel van elektrolyse van water is een energie-intensief proces. Als de hele keten van brandstofproductie wordt meegenomen verslechtert de relatieve energieprestatie.

Er zijn meerdere methoden van waterstofproductie beschikbaar. Voorbeelden zijn reststromen uit industriële processen en reforming uit biogas. Bij het vergelijken van de duurzaamheid van brandstofcellussen en dieselbussen zullen winning en productiemethoden moeten worden meegenomen.

Gedurende de periode stonden de beide bussen 32% van de beschikbare tijd stil, hoofdzakelijk wegens defecten, storingen en modificaties aan de aandrijflijn. De bussen zijn in kleine serie ontwikkeld en gebouwd. Het complexe tractiesysteem en de integratie met alle elektrische systemen op een bestaand busplatform betekende in de praktijk dat er vaak technische aanpassingen, reparaties en verbeteringen aan de voertuigen moesten worden doorgevoerd.

De pilot heeft bewezen dat het mogelijk is om een zware stadslijn te rijden met gelede bussen op waterstof. De volgende stap is het verhogen van de betrouwbaarheid van de voertuigen, het verlagen van de afhankelijkheid van het waterstofvulpunt en het inzetten van waterstof uit hernieuwbare bronnen.

Vervolg na de pilotperiode

De inzet van de bussen eindigt voor het GVB niet met het einde van de monitoringsperiode. Het GVB heeft de bussen gedurende 2014 nog ingezet.





Bijlage A Overzicht projecten

Project partners	Regio Twente, gemeente Enschede, Connexxion, VDL	Samenwerkingsverband Regio Eindhoven, gemeente Eindhoven, Hermes, PDE Automotive, Rolande LNG, NONO _x 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, Connexxion, 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