

# › INZETBAARHEID VAN ZERO EMISSIE BUSSEN IN NEDERLAND

Voor het Ministerie van Infrastructuur en Milieu

› DATUM: 30 maart 2015  
RAPPORNUMMER: TNO 2015 R10315

**TNO** innovation  
for life

## › AUTEURS

Robin Vermeulen  
Robert Koffrie  
Gertjan Koornneef  
Sam van Goethem  
Mark Bolech

**TNO-RAPPORT**

TNO 2015 R10315

Inzetbaarheid van Zero Emissions Bussen in Nederland

**DATUM**

30 maart 2015

**AUTEURS**

Robin Vermeulen

Robert Koffrie

Gertjan Koornneef

Sam van Goethem

Mark Bolech

**OPDRACHTGEVER**

De heer A.G.T. Hablé

Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Directie Klimaat, Lucht en Geluid

Postbus 20901

2500 EX Den Haag

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2015 TNO

# SAMENVATTING

In 2012 ondertekende de Minister van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu de Green Deal Zero Emissie Busvervoer, met als ultieme doel een volledig emissievrije bussenvloot in 2025. Dat betekent een ambitie om in 2025 alle OV-bussen te hebben voorzien van elektrische aandrijving, waaronder batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch.

Elektrische bussen kennen momenteel een beperktere inzetbaarheid dan conventionele bussen met een dieselvebrandingsmotor. De inzet van elektrische bussen in de aanloop naar 2025 heeft daarom een grote impact op bijvoorbeeld dienstrooster en de *total cost of ownership* (TCO) van de bussenvloot.

Voor goede keuzes omtrent de in te zetten bussen is gedegen objectieve informatie over de inzetbaarheid van innovatieve busconcepten onmisbaar. Daarom heeft TNO in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu in het project 'Zero Emissie Bussen' metingen uitgevoerd aan vier typen innovatieve bussen. Het gaat dan om bussen met een hybride aandrijving met en zonder plug-in faciliteit, volledig elektrische bussen en een bus op waterstof.

TNO heeft eerst de parameters vastgesteld die de inzetbaarheid van zero emissie bussen bepalen. Daarna zijn van zes bussen deze parameters onder Nederlandse omstandigheden gemeten. Met deze informatie kan TNO uitspraak doen over de inzetbaarheid van de verschillende typen bussen in de Nederlandse praktijk.

De conclusie is dat per situatie bepaald zal moeten worden welk concept met bijbehorende specificaties het beste geschikt is. De meest bepalende specificaties van een concept die van invloed zijn op de inzetbaarheid zijn; energieopslag (elektrisch, waterstof), laadsnelheid, laadinfrastructuur, energieverbruik en passagierscapaciteit.

In de praktijk hebben – naast de specificaties van een concept – de volgende variabelen de grootste impact op de inzetbaarheid waar rekening mee dient te worden gehouden. Dit zijn:

- klimaat
- belading
- type rit
- rijstijl

De doorgemeten zero emissie bussen zijn nog niet voor elk soort inzet geschikt. Wel bestaat voor de komende jaren veel potentie voor een forse verbetering van de inzetbaarheid van zero emissie bussen.

Er komen nieuwe technologie en concepten op de markt die elk nieuwe mogelijkheden bieden ten aanzien van ZE busvervoer. Denk hierbij aan batterijtechnologie, snelladen en gelegenheidsladen. Om op grote schaal ZE busvervoer te implementeren is veel nieuwe kennis nodig omtrent de nieuwe innovatieve systemen die op de markt beschikbaar komen.

Het verdient aanbeveling nieuw op de markt te verschijnen concepten door te meten, nader onderzoek te doen naar zaken die de inzetbaarheid beïnvloeden en de gegevens van dit onderzoek te gebruiken voor optimalisering van het TCO model.

## AFKORTINGEN

BEV	Battery Electric Vehicle
$E_{AC}$	Electric
FCEV	Fuel-Cell Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
NEC	Nett Energy Change
PHEV	Plug-in Electric Vehicle
PM	Particulate Matter
SORT	Standardised On-Road Test cycles
TCO	Total Cost of Ownership
TTW	Tank-To-Wheel
ZE	Zero Emissie

# INHOUD

<b>STATUS QUO EN VOORUITBLIK</b>	<b>5</b>
<b>INLEIDING</b>	<b>6</b>
<b>ZERO EMISSIE BUSCONCEPTEN</b>	<b>8</b>
<b>INZETBAARHEIDSCRITERIA VOOR ZERO EMISSIE BUSCONCEPTEN</b>	<b>9</b>
<b>MEETPROGRAMMA ZE BUSCONCEPTEN</b>	<b>11</b>
<b>MEETRESULTATEN ZE BUSCONCEPTEN</b>	<b>16</b>
<b>GENORMALISEERDE RESULTATEN ZE BUSCONCEPTEN</b>	<b>21</b>
<b>INVLOEDSFACTOREN</b>	<b>25</b>
<b>PRAKTIJKVOORBEELDEN</b>	<b>31</b>
<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>33</b>
<b>REFERENTIES</b>	<b>35</b>

# ZERO EMISSIE BUSVERVOER: STATUS QUO EN VOORUITBLIK

De transitie naar zero emissie busvervoer begint zichtbaar vorm te krijgen. Naast de kleinschalige inzet van pilots zijn er een aantal voorbeelden waarbij niet alleen duurzaamheid, maar ook zero emissie een onderdeel is geworden van de concessie uitvraag. Vervoerders pakken dit op en maken zero emissie een significant onderdeel van hun aanbod. Dit komt niet alleen door de eisen in de uitvraag, maar ook omdat de eerste ervaringen met zero emissie bussen hebben geleerd dat de praktische inzet wel degelijk mogelijk is en dat de kosten concurrerend zijn of worden. En dat zet het wiel in beweging. Door de snelle toename van de hoeveelheid gevraagde zero emissie bussen, komt de gewenste schaalvergroting op gang. Dit betekent een groter aanbod van zero emissie bussen en vooral: dalende kosten.

De resultaten van deze studie laten zien dat zero emissie busconcepten praktisch inzetbaar zijn. Maar dat deze praktijkomstandigheden ook bepalend zijn voor de vraag welke type bus in welke situatie geschikt is. Dat hierbij verder gekeken moet worden dan het simpelweg 'vervangen' van een conventionele bus door een zero emissie bus, komt duidelijk uit de resultaten naar voren. De eigenschappen van de bus in relatie tot de praktijkomstandigheden vragen aanpassingen in de operatie om zoveel mogelijk kilometers zero emissie te kunnen rijden **en** om tot een zo gunstig mogelijk kostenplaatje te komen. Het vereist een andere manier van denken om tot dit optimale plaatje te komen. Bijvoorbeeld door kosten te besparen met een kleinere batterij door vaker tussentijds op te laden en de dienstregeling hier, waar nodig, op aan te passen. Of door keuzes te maken waar zero emissie het allerbelangrijkst is en een hybride voertuig dan juist dáár zero emissie te laten rijden. Of door slim de inzet van batterij-elektrische en waterstof-elektrische bussen te combineren in het vervoersgebied, op basis van de vereiste autonomie van de bussen. Of door na te denken of een gedeeltelijke trolley oplossing al dan niet goedkoper is dan andere manieren van opladen.

Het moge duidelijk zijn dat dit complexe vraagstukken zijn. De resultaten van deze studie bieden een handreiking om deze complexiteit hanteerbaar te maken. En dat is een vereiste om de transitie succesvol door te kunnen zetten. De volgende stappen in de transitie gaan namelijk over een verdere schaalvergroting en dus aanpassingen op systeemniveau, niet alleen op voertuigniveau. En over het daarvoor vereiste vertrouwen in de nieuwe oplossingen, niet in de laatste plaats op basis van de business case van het totaalplaatje. Vertrouwen komt uiteindelijk tot uitdrukking in een toenemend aanbod van oplossingen, maar ook heel concreet in de restwaarde van de nieuwe busconcepten. Waarmee het wiel steeds harder gaat draaien.

Wat is nu concreet nodig als vervolg op deze studie, in het licht van de vorderingen van de transitie? Ten eerste moet er maximaal geleerd worden van alle praktijktesten met zero emissie bussen, zowel in pilots als in grotere vloten. Dit vereist het definiëren van concrete vraagstelling voor de specifieke situatie en een efficiënte monitoring van die praktijkparameters, die nodig zijn om antwoord te geven op de vragen. Deze monitoring betreft niet alleen technische parameters, maar vooral ook financiële en gedragsmatige. Het is van groot belang dat de in de praktijk opgedane kennis snel doorstroomt naar alle relevante stakeholders. Wat resulteert in het tweede punt: met de resultaten van deze studie, in combinatie met monitoringdata, kunnen specifieke scenario's in vervoersgebieden doorgerekend worden. Hiermee kan op voorhand een duidelijk beeld worden gegeven van de technische en financiële haalbaarheid van zero emissie oplossingen, geredeneerd vanuit het totale systeem en niet alleen vanuit de bus. Wat ons automatisch leidt naar het derde punt: het is van groot belang om zero emissie op een consequente en haalbare manier op te nemen in concessie uitvragen. De transitie en alle betrokkenen zijn erbij gediend om in alle concessies te werken met dezelfde kaders, aannames, methodieken etc. De kennis is inmiddels voorhanden om dit gestalte te geven en de wil tot samenwerking is er. Dus laten we het met zijn allen gaan doen!

# INLEIDING

## VOOR WIE?

Dit document biedt een handreiking aan degenen die betrokken zijn bij de aanschaf en inzet van zero emissie bussen voor het openbaar vervoer. Voor dit soort bussen zijn er namelijk tal van nieuwe factoren die, anders dan bij conventionele dieselbussen, de inzetbaarheid van een bus in de dagelijkse praktijk bepalen. Daarom is het goed om te weten welke factoren dit zijn en hoe en in welke mate deze de inzetbaarheid kunnen beïnvloeden.

Een bekend voorbeeld van hoe de inzetbaarheid kan worden beïnvloed, vindt men bij een batterij-elektrische bus. Waar een dieselbus voldoende energie aan boord kan nemen om een hele dag of langer ingezet te worden, is de energievoorraad aan boord van een batterij-elektrische bus vaak veel geringer en is de grootte van de energieopslag zelfs variabel in de tijd, de 'tank' wordt over de levensduur kleiner.

Het grootschalig in dienst nemen van een dergelijk concept vergt daarom vaak een aanpassing van het dienstschema en kan grote consequenties hebben voor delen van de TCO. Daarom is enerzijds inzicht nodig in de inzetbaarheid, bijvoorbeeld in de autonome actieradius van de bus en de laadtijd van de batterij zodat het rooster daarop aangepast kan worden en de consequenties voor de kosten kunnen worden becijferd. Anderzijds is de garantie nodig dat de autonome actieradius in de dagelijkse praktijk wordt gehaald.

In dit rapport komt aan bod wat technisch bepalende factoren zijn voor de inzetbaarheid van een aantal innovatieve busconcepten zodat daarmee rekening kan worden gehouden. In een aantal praktijkcases wordt getoond hoe de inzetbaarheid in de praktijk uitpakt voor een paar sprekende voorbeelden.

## ACHTERGROND EN AANLEIDING

In 2008 heeft de Staatssecretaris van het voormalige ministerie van Verkeer en Waterstaat een innovatieprogramma 'Pilotprojecten Openbaar Vervoer per Bus' uitgebracht, een subsidieprogramma om praktijktests met innovatieve, schone en zuinige bussen in een normale dienstregeling uit te voeren gedurende verscheidende jaren. Dit programma is in 2014 afgerond. In het innovatieprogramma is opgenomen dat het Ministerie door een onafhankelijke instantie objectieve evaluatietests zal laten uitvoeren om de prestaties van de bussen te meten om inzicht te krijgen in de inzetbaarheid, de kosten en de milieu- en brandstofverbruikprestaties. Dit heeft als doel om uitkomsten algemeen toe te kunnen passen en op te schalen en daarvoor zo nodig ook normen of inkoop-eisen te ontwikkelen. Dit is in 2008 uitdrukkelijk als voorwaarde opgenomen bij de toekenning van de ruim €10 mln. subsidiegelden.

In 2012 is er een 'Green Deal Zero Emissie Busvervoer' afgesloten tussen het ministerie van Infrastructuur en Milieu, het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, de stichting Zero Emissie Busvervoer en decentrale overheden. De Green Deal heeft tot doel om in de periode van 2015-2025 in alle openbaar busvervoerc concessies 'Zero Emissie' als eis voor inzet van de bussen (5000 stuks) op te laten nemen.

Om na te gaan welke van de innovatieve technieken het best kunnen worden ingezet om de doelen van de Green Deal te bereiken, zal dit programma samen met de evaluatie van het innovatieprogramma in worden gezet om het inzetbaarheidspotentieel van de ZE busconcepten in te kunnen schatten.

## DOELSTELLING

Het project 'Inzetbaarheidspotentieel Zero Emissie Bussen' heeft tot doel:

- om objectief inzicht te verkrijgen in de inzetbaarheidsmogelijkheden van zero emissie bussen om de ambities van Zero Emissie Openbaar Busvervoer te helpen realiseren, zoals die zijn neergelegd in de gelijknamige Green Deal;
- om aan de hand van dit project steekproefsgewijs informatie van ZE busconcepten te verzamelen die ingebracht kan worden in de activiteiten die het ministerie van I&M onderneemt om tot gemeenschappelijke Europese normen te komen om de Europese ambitie om 60 tot 80% CO<sub>2</sub>-reductie in 2050 te realiseren.

## AANPAK

Wanneer het gunstig is om tot aanschaf van op nieuwe concepten gebaseerde bussen over te gaan, zal van een aantal technische en economische factoren afhangen. Bovendien zijn de beproefde zero emissie busconcepten onderling verschillend, wat sterk bepalend kan zijn voor de inzetbaarheid. Daarom worden de innovatieve bussen in dit rapport op basis van een paar **meetbare** inzetbaarheids-criteria met elkaar vergeleken. De volgende inzetbaarheids-criteria zijn gebruikt:

- Energieverbruik
- Passagierscapaciteit
- Autonome actieradius
- Effectieve laadtijd

De genoemde criteria hebben geen vaste waarde, maar een waarde die sterk kan afhangen van de beschouwde bus met gegeven **aandrijfconcept**, **laadtechniek**, de **omgevingscondities** (klimaat; het weer), de **inzet** (rijprofiel; stad, buitengebied) en de **bestuurder** (rijstijl). Daarom worden enkele van deze invloeden gemeten in een meetprogramma en worden sommige ook doorgerekend voor de Nederlandse praktijksituatie zodat deze informatie bij de keuze van een concept kan worden gebruikt voor het bepalen van de technische inzetbaarheid van een ZE bus.

### 1. Bepalen van de inzetbaarheidscriteria

Welke criteria bepalen de inzetbaarheid van een ZE bus en kunnen worden gemeten of worden vastgelegd in vuistregels?  
 → **Relevante inzetbaarheidscriteria**

### 2. Doormeten van de ZE bussen voor het bepalen van de inzetbaarheid onder standaard testcondities

Een aantal ZE bussen zijn doorgemeten. De metingen zijn zoveel mogelijk gedaan met bestaande procedures of uitbreidingen daarop.

De testcondities zijn 'standaard' en representeren daarom maar een beperkt deel van de praktijk.

→ **Resultaten van een aantal ZE busconcepten**

Voorts zijn de meetresultaten genormaliseerd. Dit is gedaan om de het mogelijk te maken om bussen in verschillende stadia van ontwikkeling te kunnen vergelijken.

→ **Genormaliseerde resultaten van een aantal ZE busconcepten**

### 3. Inzetbaarheid van ZE busconcepten in de NL praktijk

Welke variabelen uit de NL praktijk hebben bovenop standaardcondities invloed op de inzetbaarheid van de ZE busconcepten en in welke mate?

De gegevens van de metingen worden gebruikt om de Nederlandse situatie te modelleren, rekening houdend met variabelen als klimaat en passagiers.

→ **Inzicht in de praktijkinzetbaarheid in NL**

# ZERO EMISSIE BUSCONCEPTEN

Het project richt zich onder meer op bussen uit de zeven 'Pilotprojecten Openbaar Vervoer per Bus' van het gelijknamige innovatieprogramma dat is opgezet door het voormalige ministerie van Verkeer en Waterstaat in 2008 en wat een looptijd heeft tot 2014. In 2012 is de Green Deal afgesloten. De Green Deal heeft tot doel om in de periode van 2015-2025 in alle openbaar busvervoerconcessies 'Zero Emissie' als eis voor inzet van de bussen (5000 stuks) op te laten nemen. Het uiteindelijke doel is dus alle bussen volledig emissievrij. Op weg daarnaar toe kan gestart worden met zero emissie in stedelijke omgeving. Een zero emissie bus met de stand van de techniek van vandaag moet dus in stedelijke omgeving volledig emissievrij kunnen rijden.

De busconcepten die voldoen aan de zero emissie gedachte en die behandeld worden in dit rapport zijn:

- Batterij Elektrische Voertuigen (lokaal emissieloos) (BEV).  
Er wordt onderscheid gemaakt tussen 2 concepten:
  - een BEV met een batterij met een grote capaciteit en een relatief hoge actieradius;
  - een BEV met een batterij met een kleine capaciteit die gedurende een dag meermalen wordt bijgeladen.
- Hybride voertuigen:
  - Brandstofcel-elektrische Voertuigen (lokaal emissieloos) (FCEV);
  - Plug-in Hybride Elektrisch Voertuig (PHEV): dit type kan part-time en lokaal emissieloos rijden;
  - Hybride Elektrisch Voertuig (HEV): dit type laadt onderweg zijn batterij op en kan doorgaans niet of slechts voor een korte duur emissieloos rijden.





# INZETBAARHEIDS- CRITERIA VOOR ZERO EMISSIE BUSCONCEPTEN

Zero Emissie vereist dat een bus (deels) een andere aandrijving krijgt. ZE sluit namelijk uit dat een conventionele of zelfs een schone Euro VI dieselmotor gebruikt kan worden voor de aandrijving van de bus in stedelijke omgeving. De mogelijkheden voor ZE liggen voornamelijk in het elektrificeren van de aandrijving zodat daarmee emissieloos gereden kan worden. Er zijn echter een reeks verschillende keuzes te maken ten aanzien van de beschikbare aandrijfconcepten en de bijbehorende energievoorziening (batterij met laadinfra, brandstofcel met tankinfra, range-extender, trolley, ...) en dat heeft implicaties voor de inzetbaarheid van een bus in de praktijk. Daarom is in dit onderzoek gekeken naar de eisen die gesteld worden aan standaard OV-bussen zodat die kunnen worden vergeleken met de inzetbaarheid van ZE concepten.

Om een beter beeld te krijgen van die eisen is een aantal interviews afgenomen. Dat is gebeurd met betrokkenen uit de praktijk die eerder pilots met (deels of volledig) zero emissie bussen van nabij hebben meegemaakt. Daartoe zijn de interviews gedaan met enkele concessienemers, concessieverleners, een leasemaatschappij en een adviesbureau.

In deze interviews is gekeken naar de eisen die in het algemeen aan de bussen worden gesteld, maar in het bijzonder is ook gekeken naar die aspecten waarop een zero emissie bus al goed voldoet en die waarop de huidige ZE bussen juist nog tekort schieten. Dit heeft geleid tot een lijst van criteria die belangrijk zijn bij het maken van keuzes voor een ZE busconcept.

De inzetbaarheidseisen en andere aandachtspunten die op deze wijze zijn verzameld, worden hierna opgesomd.

# INVENTARISATIE

## PRIMAIRE EISEN UIT HET BESTEK

- Dienstenkilometers. Dit bepaalt samen met de actieradius hoeveel bussen (of bijlaadvoorzieningen) nodig zijn (bij batterij elektrische voertuigen: rekening houdend met onder meer de technische levensduur van de accu!)
- Vervoerscapaciteit (aantal passagiers per 12 m bus)
- Rijprestaties zoals maximaal rijdbare helling
- Reizigerscomfort (klimaat, geluid, trillingen).

## BEPALEND VOOR DE BEDRIJFSKOSTEN

In deze categorie worden de criteria opgesomd die direct van invloed zijn op de variabele kosten van het in bedrijf hebben van een bepaalde bus.

### Voertuiggerelateerde eigenschappen

- Energiebehoefte (kWh/km) en voor (P)HEV ook l/km
- Betrouwbaarheid (vervangend materieel en evt. boetes)
- Onderhoud/service
- Levensduur energieopslag (accu) in relatie tot hoog laadvermogen (indien van toepassing).

### Organisatiegerelateerd (verschillend per concessie)

- Omrijd/klaarmaakkosten (laden, bussen wisselen)
- Chauffeurskosten (vooral voor meer bussen dan oorspronkelijk en tegenvallende betrouwbaarheid extra kosten!)
- Concessieduur (afschrijving en vooral ook voor infrastructuur!)
- Infrastructuur.

## RANDVOORWAARDEN

- Inkoop inclusief service/garanties/terugnameverplichtingen (een service level agreement): alleen solide, gevestigde leveranciers worden geacht zo'n omvangrijk contract te kunnen leveren en onder alle omstandigheden na te kunnen komen.

- Betrouwbaarheid, in de zin van een berekenbare, vertrouwenwekkende beschikbaarheid van de bus, is cruciaal. Dit in verband met boetes bij het missen van diensten en de mogelijk noodzakelijke kostbare inleen van vervangend materieel.
- De afnemer (concessienemer) wil absolute duidelijkheid krijgen over het product (eigenschappen in de praktijk, levensduurverwachting etc.) en de partijen erachter (opnieuw de behoefte aan solide voertuigleveranciers).

## ANDERE BELANGRIJKE PUNTEN

- Inzetbaarheid ZE bus moet volgens de meeste geïnterviewden ongeveer gelijk zijn aan die van een gewone bus. Dat betekent dat bussen in de praktijk goeddeels uitwisselbaar zijn en elkaars diensten over kunnen nemen (ten minste voor een groot deel).
- Een kleine busomloop uit de dienstregeling halen, verlaagt de efficiëntie van de hele dienststopbouw en is dus kostenverhogend. Deze optie wordt vaak genoemd als passend bij een ZE bus met beperkte actieradius, maar verlaagt dus de efficiëntie voor de concessienemer. Juist bij de manier van concessie verlenen waarbij sterk op minimale kosten wordt gestuurd is zo'n efficiëntievermindering ongewenst.
- Waardeontwikkeling van ZE bussen in de tijd, zoals restwaarde?
- Laadinfrastructuur, in het bijzonder snellaadvarianten (hoog vermogen) of bovenleidingen, moet over lange tijd worden afgeschreven. Praktische oplossingen hiervoor kunnen zijn om de energie-infra in die gevallen overheidsbezit te maken of door een (veel) langere concessieduur af te spreken.

De tabel geeft een uitvoerig overzicht van alle relevante criteria. Bepalend voor de uiteindelijke keuze van criteria, die meegenomen worden in dit project, is a) objectief meetbaar en kwantificeerbaar; en b) doorslaggevend voor inzetbaarheid van zero emissie bussen. Onderstaande criteria zijn meegenomen in het onderzoek. De groen weergegeven criteria worden primair meegenomen, de oranje zijn minder eenvoudig kwantificeerbaar en konden binnen de scope van het onderzoek niet worden meegenomen.

criterium	Uit te drukken in:
Autonome actieradius	km
Effectieve laadsnelheid (-en laadtijd)	kW
Passagierscapaciteit	#passagiers, massa, m <sup>2</sup>
Energieverbruik	kWh/km
Prestaties	Acceleratie, helling, maximum snelheid
Passagierscomfort	HVAC (verwarming, ventilatie en airconditioning)
Betrouwbaarheid	Percentage up-time
Batterijveroudering	Verlies van capaciteit over tijd

# MEETPROGRAMMA ZE BUSCONCEPTEN

Er zijn metingen gedaan om een aantal inzetbaarheidsparameters te bepalen van de verschillende innovatieve zero emissie busconcepten, onder standaard testcondities. De meetdata zijn gebruikt als input voor een rekenmodel waarmee Nederlandse praktijkinvloeden kunnen worden doorgerekend, zoals het effect van de belading en het klimaat, op energieverbruik en de actieradius.

De volgende criteria zijn gemeten:

- SORT energieverbruik
- SORT actieradius
- Passagierscapaciteit
- Effectieve laadsnelheid.

In het volgende deel komen de volgende onderwerpen achtereenvolgens aan de orde:

- Selectie van de busconcepten en achtergrond
- Korte beschrijving van het testprogramma
- Uitleg SORT procedure voor het bepalen van energieverbruik en actieradius onder standaard condities
- Resultaten per ZE busconcept
- Resultaten waarbij ZE busconcepten vergeleken worden.

## SELECTIE BUSSEN

De selectie van bussen heeft als volgt plaatsgevonden:

- Enkele bussen zijn geselecteerd uit het innovatieve busprogramma. Deze voldoen aan de ZE gedachte, dat wil zeggen: ze kunnen emissieloos rijden in het bijzonder in stedelijk gebied. Dit betreft een PHEV, HEV (en FCEV) busconcept.
- Deze selectie is aangevuld met twee batterij-elektrische bussen omdat dit type aandrijving nog niet was vertegenwoordigd in het innovatieve busprogramma en omdat dit type aandrijving een belangrijke kandidaat is voor ZE busvervoer.
- Eén batterij-elektrische bus (E) is in een eerder programma gemeten. De resultaten daarvan zijn grotendeels geschikt om op te nemen in dit onderzoek. Dit brengt het totaal aantal BEV concepten op drie, waarbij de batterijcapaciteit een significant verschil laat zien.
- De gemeten busconcepten in dit programma zijn geanonimiseerd, aangezien het hoofddoel van het project is om te komen tot gekwantificeerde inzetbaarheids-criteria en niet om specifieke producten te testen.
- Enkele bussen zijn nog prototypes (A, C en F). Daar moet rekening mee gehouden worden bij het beoordelen van de resultaten. De resultaten van de bussen kunnen dus niet altijd direct met elkaar vergeleken worden, vanwege de verschillen in stand van ontwikkeling. Dat is voor het onderzoek geen belemmering, aangezien daarvoor het primair gaat om de typische karakteristieken van de verschillende ZE concepten.

	A	B	C	D	E	F
Type	12 m	18 m	12 m	12 m	12 m	12 m + aanhangwagen
Aandrijving	PHEV	HEV	BEV	BEV	BEV	FCEV
Tractie	elektromotor	elektromotor	elektromotor	elektromotor	elektromotor	elektromotor
Energie aan boord	diesel+batterij	diesel+batterij	batterij	batterij	batterij	waterstof+batterij
Batterij (kWh)	124	8	80	324	211	80
Opmerking	prototype		prototype			prototype

# MEETPROGRAMMA SORT

Er zijn praktijktests gedaan, onder standaard condities, voor het bepalen van energieverbruik en actieradius: dit is gedaan op basis van de zogenaamde (UITP) SORT test.

De testen zijn gedaan op het testcircuit Lommel (B): dit circuit heeft een lang recht stuk voor het herhalen van SORT cycli van type 1, 2 en 3. Uitleg hierover volgt later in dit document. Het circuit heeft ook een ovale baan die is gebruikt voor het (langdurig) rijden om de tractiebatterij (actieradius) volledig te ontladen tot het minimale niveau dat door de fabrikant wordt opgegeven.

Voor de BEV en PHEV:

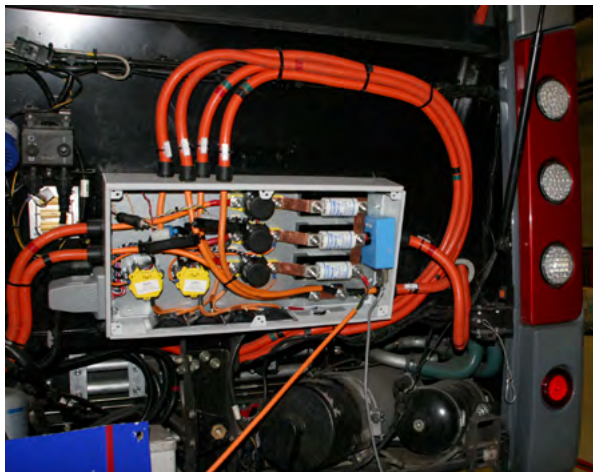
- is het SORT Energieverbruik in kWh/km bepaald: gemeten is het stekkerverbruik ( $E_{AC}$ ), dit is inclusief de verliezen in de on-board lader en batterijen.
- is de SORT Actieradius (km) bepaald: dit is te berekenen uit: SORT batterij-energieverbruik (kWh/km) / nuttige energie inhoud batterij (kWh).

Voor de PHEV is het stekkerverbruik en tevens het dieselverbruik [l/100 km] in verschillende hybride modi bepaald.

Voor de FCEV is het H<sub>2</sub>-verbruik in kg/km bepaald en is het rendement van de H<sub>2</sub>-stack bepaald.

De volgende instrumenten en apparatuur zijn gebruikt:

- Laadstroom (energie): kWh meter *off-board*
- Batterij energie: uit batterijstroom ( $I_{batt}$ ) en spanning ( $U_{batt}$ )
- Brandstofverbruik (l/100 km): brandstoftlowmeter (l/s) (voor de PHEV)
- Waterstofverbruik: H<sub>2</sub>-debiet in g/s (voor de FCEV)
- Voertuigsnelheid (km/h): GPS
- Dataopslag, weerstation
- Mobiele generatorset voor AC stroomvoorziening.



UITP, de wereldwijde overkoepelende organisatie voor openbaar vervoer, heeft in het verleden een procedure ontwikkeld om het brandstofverbruik van een standaard diesel bus te kunnen bepalen met een relatief eenvoudige praktijktest: de **SORT** test (UITP, 2009). **Het doel van de test is het onderling kunnen vergelijken van energieverbruik/brandstofverbruik/CO<sub>2</sub>-uitstoot van standaardbussen**, zodat voor een concessie de meest gunstige kan worden gekozen of zodat kan worden getoetst of een aangeboden bus aan speciale eisen voldoet die zijn gesteld ten aanzien van deze verbruiksparameters.

Voor de diesel-elektrische hybride bus (*charge sustaining*, zelfvoorzienend, dus zonder stekker) is een SORT procedure beschikbaar (SORT HY), voor een diesel-elektrische plug-in (*charge depleting*) hybride en een volledig elektrische bus is de SORT testprocedure nog in ontwikkeling. Een definitieve versie van de testprocedure wordt in de tweede helft van 2015 verwacht. Voor deze twee laatste aandrijfconcepten is een voorlopig testprogramma gebruikt, gebaseerd op de principes van SORT en de ontwikkelingen van de procedures tot dusver.



# DE SORT TEST VOOR HET BEPALEN VAN HET ENERGIE- VERBRUIK

De SORT test wordt breed gedragen. De SORT test is ontwikkeld door een speciale werkgroep van het UITP. In de werkgroep zitten busfabrikanten, concessieverleners, concessienemers, toeleveranciers en testinstanties. Het doel van de SORT test is het kunnen vergelijken van het energieverbruik van standaard OV-bussen, op diesel en diesel-hybride.

In 2015 komen ook testen beschikbaar voor aardgas, waterstof, de plug-in hybride en de batterij-elektrische bus. Daarnaast is er een SORT test in ontwikkeling voor touringcars/coaches.

De SORT test is een pragmatische test die in de praktijk, op een testcircuit wordt uitgevoerd en omvat een 3-tal ritcycli en een procedure met eisen ten aanzien van de uitvoering van de test.

De ritcycli zijn door de werkgroep speciaal ontwikkeld en bevatten ritprofielen die zoveel mogelijk overeenkomen met de praktijkinzet van OV-bussen. Er zijn echter een aantal beperkingen die verderop worden besproken.

Er zijn 3 verschillende ritten te weten SORT 1, 2 en 3 die elk een verschillend snelheidsregime vertegenwoordigen:

- SORT 1: stedelijk centrum, de gemiddelde snelheid is 12 km/h, de maximum snelheid is 40 km/h.
- SORT 2: stedelijk, de gemiddelde snelheid is 18 km/h, de maximum snelheid is 50 km/h.
- SORT 3: stedelijk randgebied, 25 km/h, de maximum snelheid is 60 km/h.

Doorgaans worden de resultaten van de 3 SORT cycli gewogen, naar gelang de bedoelde inzet van de bus.

**De SORT test is een test die gedaan wordt onder standaard condities en is dus eigenlijk alleen maar representatief voor die gegeven condities.** Het is dus belangrijk om te weten in welke mate SORT verschilt van de praktijk, omdat dit mede bepalend is voor de uiteindelijke inzetbaarheid in de NL praktijk.

Voor het energieverbruik dat van alle aandrijfconcepten volgens SORT bepaald wordt, en ook de autonome actieradius van batterij-elektrische voertuigen en plug-in voertuigen met een *range-extender*, geldt dat het energieverbruik van een aantal *auxiliary* systemen niet wordt meegenomen in SORT. Dit zijn:

- De airconditioner: deze staat uit tijdens de test.
- De verwarming: deze staat uit tijdens de test.
- Meestal de stuurpomp: er zitten formeel geen bochten in een SORT test. Een inefficiënt systeem kan echter actief zijn, ook zonder vermogensvraag.
- Accessoires als informatiesystemen, het knielsysteem, het oprijstelsysteem voor rolstoelen: deze staan uit tijdens de test of worden niet bediend dan wel gebruikt.
- Rijstijlinvloeden: de ritcycli zijn vastgelegd en daarmee wordt de invloed van de chauffeur zo veel als mogelijk beperkt.
- Klimaatinvloeden: de test moet binnen zekere grenzen van buitentemperatuur plaatsvinden.
- Beladingsinvloeden (1 vaste belading).

De **belading** is voor een SORT test genormaliseerd zodat de bussen vergelijkbaar worden getest. De belading wordt bepaald aan de hand van het theoretisch effectief beschikbare vloeroppervlak. Er wordt vanuit gegaan dat dit vloeroppervlak wordt bezet met een vast aantal stoelen per vierkante meter en een zekere fractie daarvan bezet wordt door passagiers. Het aantal stoelen en passagiers wordt bepaald op basis van de buitenmaten van de bus (LXB). Hieruit wordt een testmassa bepaald (typisch 3,2 ton voor een 2,55 × 12 m bus), van deze massa worden afgetrokken de massa van meetapparatuur, testingenieur(s) en alle niet standaard accessoires zoals airco, displays, rolstoelhelling, ticketsysteem, dubbele beglazing, bestuurderscabine, ... Zo worden de bussen vergelijkbaar getest. Voor innovatieve bussen geldt dat een eventueel zwaardere aandrijflijn of batterij natuurlijk wel wordt meegenomen in de testmassa. Uiteraard zal de massa in de praktijk invloed hebben op het energieverbruik en de actieradius en moet rekening gehouden worden met :

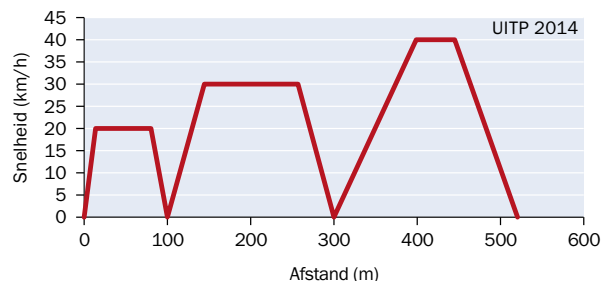
- een variërende belading van de passagiers;
- de accessoires die wel gemonteerd zijn maar die in mindering zijn gebracht op de testmassa om de bussen vergelijkbaar te kunnen testen;
- het werkelijk aantal stoelen dat is geplaatst. De test gaat uit van een standaard hoeveelheid per m<sup>2</sup>.

Om voorgaande redenen wordt in het hoofdstuk 'Invloedsfactoren' het effect van de belading op energieverbruik en actieradius bepaald, evenals de invloed van het klimaatbeheersingssysteem op deze inzetbaarheidscriteria.

# SORT CYCLI

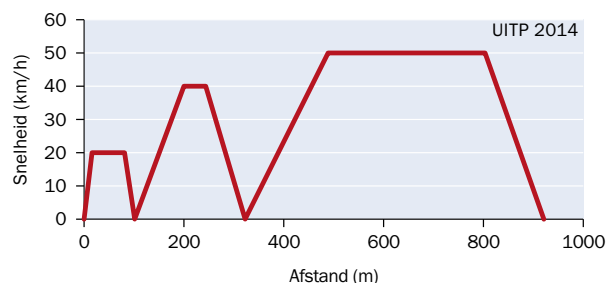
## SORT 1

Stedelijk centrum – lage doorstroming



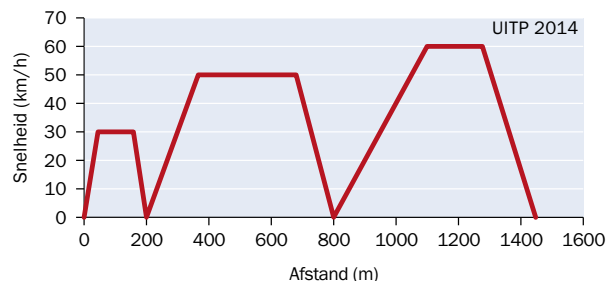
## SORT 2

Stedelijk – normale doorstroming



## SORT 3

Stadsperiferie



De SORT cycli zijn snelheid-afstand profielen. Dat wil zeggen: binnen bepaalde vaste afstanden moet een bepaalde snelheid worden bereikt (acceleratie en deceleratie) of constant worden gehouden. Elke cyclus moet een aantal keer herhaald worden zodat een betrouwbaar gemiddelde uitgerekend kan worden.

Elke SORT cyclus heeft tussen de 'trapeziums' stoptijden om haltering te simuleren. Hierbij moeten de voordeuren worden geopend. De stoptijden zijn in de meeste gevallen 20 s.

	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Rated average speed (km/h)	12.1	18	25.3
Stops/km	5.8	3.3	2.1
Stop time (%)	39.7	33.4	20.1
Trapeze 1 v-const. (km/h) / length (m)	20/100	20/100	30/200
Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	1.03	1.03	0.77
Trapeze 2 v-const. (km/h) / length (m)	30/200	40/220	50/600
Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	0.77	0.62	0.57
Trapeze 3 v-const. (km/h) / length (m)	40/220	50/600	60/650
Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	0.62	0.57	0.46
Length of stops	20/20/20	20/20/20	20/10/10
Total length (m)	520	920	1450
Deceleration (m/s <sup>2</sup> )	0.8	0.8	0.8

## VERSCHILLENDE METHODES NODIG PER ZE BUSCONCEPT

**‘Charge sustaining’** hybride voertuigen (HEV). Dit type voertuig houdt de energie-inhoud van de batterij zelf in stand tussen een bepaald minimum en maximum niveau. Testen worden vanzelfsprekend gedaan in de standaard hybride modus. Er wordt getest tot het netto energieverschil van de energie in de batterij (NEC) kleiner is dan een (klein) percentage van de energie van het dieselverbruik of er wordt gecorrigeerd voor het netto energie verschil in de batterij naar de situatie NEC = 0 (het netto energieverschil in de batterij voor en na de test batterij is 0).

**‘Charge depleting’** hybride (plugin) voertuigen (PHEV). Dit type voertuig kan vaak in verschillende modi rijden die de chauffeur kan selecteren. Het werkelijke energieverbruik en de actieradius hangen sterk af van hoe vaak de verschillende modi worden gebruikt. Voor het type voertuig uit het innovatieve busprogramma zijn testen nodig in 3 modi:

- De modus met het laagste brandstofverbruik (meestal puur elektrisch).
- De hybride modus, de modus waarbij de batterij ontladend en de range-extender wordt gebruikt om tussentijds in zekere mate bij te laden (charge depleting hybride modus). Hoe het ontladen precies verloopt, hangt af van de regelstrategie en het dagelijkse gebruik.
- De modus met het hoogste brandstofverbruik. Dit is de modus waarbij de batterij in principe een laagste niveau heeft bereikt en de range-extender voldoende energie moet leveren om minimaal de energie-inhoud van de batterij constant te houden en voldoende energie voor de aandrijving en accessoires over te houden.

**Batterij-elektrische voertuigen:** van dit type voertuig wordt het stekkerverbruik  $E_{AC}$  bepaald.

**Brandstofcel hybride:** van dit type voertuig wordt het waterstofverbruik bepaald.

## CONVENTIONELE EURO VI DIESELBUS

De Euro VI dieselbus is momenteel de technische standaard voor een conventionele aandrijving. Hieronder wordt ter referentie een samenvatting gegeven van enkele parameters van een 12 m Euro VI dieselbus.

Passagierscapaciteit	~100
Gewicht rijklaar	~11,5 t
Brandstofverbruik	38-42 l / 100 km
TTW energieverbruik	3,8-4,2 kWh/km
TTW CO <sub>2</sub> -uitstoot	1000-1100 g/km
NO <sub>x</sub> en PM (deeltjes)	0,5-3 g/km en ~10-15 mg/km

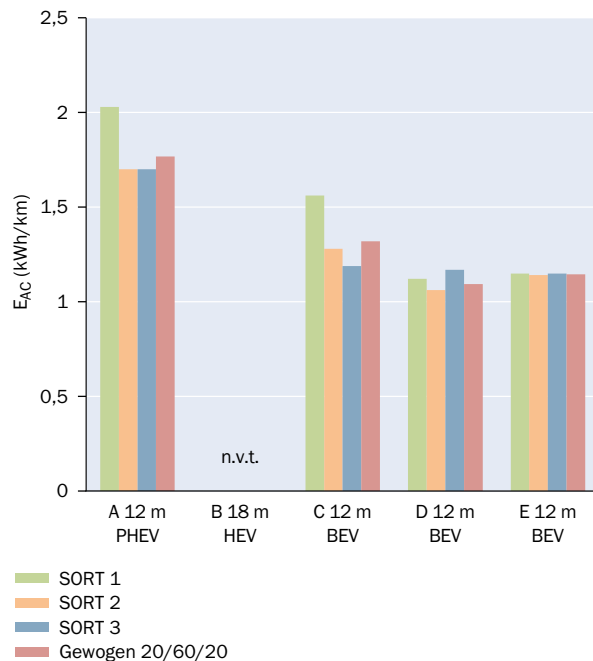


# MEETRESULTATEN ZE BUSCONCEPTEN

## STEKKER- VERBRUIK

### Alle concepten (incl. on-board lader)

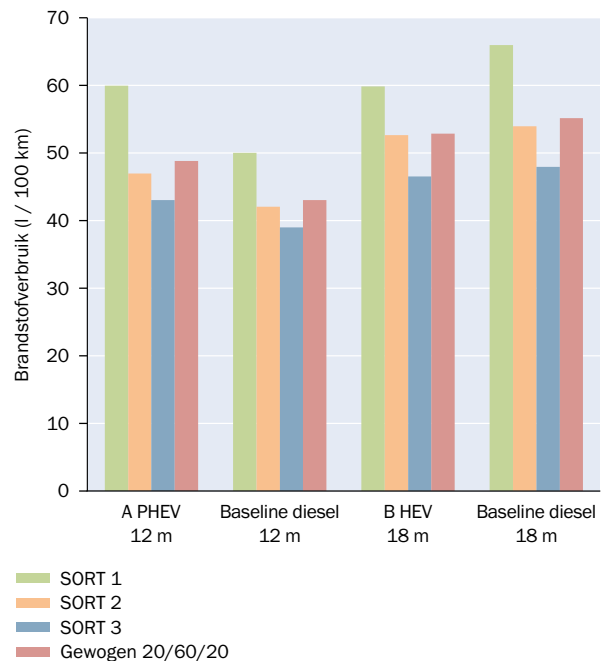
Er zijn wat geringe verschillen tussen de BEV's en is een wat hoger verbruik geconstateerd bij de PHEV. Aangetekend moet worden dat de PHEV een **prototype** is. Een deel van het hogere verbruik wordt veroorzaakt door een laag laadrendement van een ouder type lader, een ander deel door het hoge gewicht van de aandrijving met een relatief grote batterij en een range-extender aan boord. A en C zijn wat gevoeliger voor inzetpatroon, zie de verschillen tussen de SORTs, wat mogelijk veroorzaakt door management van auxiliaries, die bij lagere snelheden relatief veel impact hebben. Daarbij zijn er tussen de voertuigen wat verschillen in energie die door regeneratief remmen teruggewonnen wordt. De verschillen tussen voertuigen zijn op voertuigniveau (TTW), vergeleken met een conventionele dieselbus (3,5-4,5 kWh/km), erg laag.



## BRANDSTOF- VERBRUIK

### Van de bussen met een dieselgenerator, dan wel range-extender aan boord

Van concepten A (12 m PHEV) en B (18 m HEV) wordt het brandstofverbruik vergeleken met een baseline conventionele dieselbus van respectievelijk 12 m en 18 m (Euro VI). Het verbruik van bus A is over alle SORT cycli hoger dan de baseline. De oorzaak is het hogere gewicht door de batterij en de range-extender en de verliezen bij het opwekken van elektriciteit door de range-extender. Daarbij moet opgemerkt worden dat voertuig A parttime ZE als voordeel biedt en dat voertuig A een prototype is. Het verbruik van bus B, een productievoertuig, is alleen lager dan de baseline over SORT 1.



Voor bus A en B bij een gelijkblijvend energieniveau van de batterij (NEC = 0)



## VOERTUIG F (FCEV)

Er zijn experimentele metingen gedaan aan een **prototype** brandstofcelbus op waterstof. Het doorgemeten concept bestaat uit een 12 m bus met een vol-elektrische aandrijflijn en een batterij (80 kWh), waarbij drie brandstofcelstacks (type PEM) als range-extender fungeren. De stacks worden voorzien van waterstof uit vijf tanks met elk een opslagcapaciteit van ongeveer 5 kg waterstof. De stacks, tanks en hulpsystemen staan bij dit prototype voertuig in een aanhangwagen die door de bus wordt voortgetrokken.

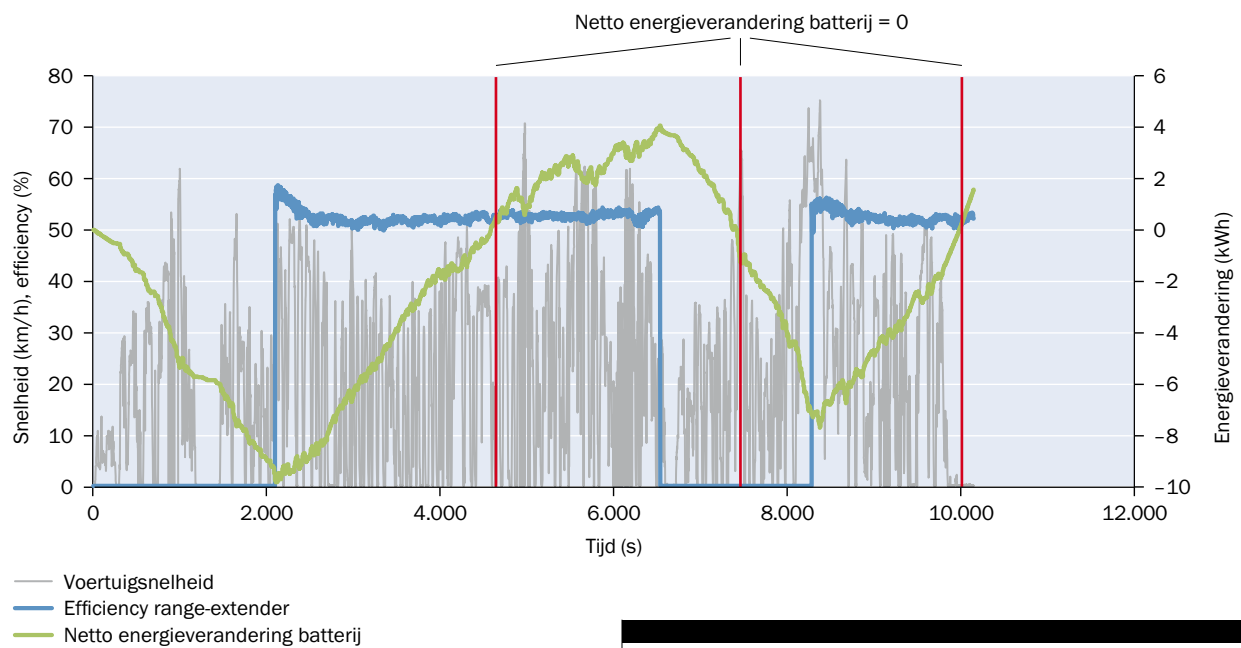
Het meetprogramma bestond uit het rijden van twee buslijnen (lijn 20 en 22 Eindhoven e.o.) met een gemengd karakter van stad en buitenweg en het rijden van een referentieronde met zeer wisselend bedrijf van stad tot snelweg. De nadruk van de metingen lag op het bepalen van het rendement van de range-extender (de waterstofstacks en bijbehorende componenten als de koeling en de DC-DC converter). Daartoe is het ingaande brandstofdebiet gemeten en de uitgaande elektrische energie naar de batterij. Voorts is gekeken naar het waterstofverbruik om een indicatie te krijgen van het verbruik onder praktijkcondities. Net als bij een diesel-elektrische hybride aandrijving moet rekening worden gehouden met het energieniveau van de batterij. Vanwege het experimentele karakter van de metingen is geen belading toegevoegd.



# RESULTATEN EXPERIMENTELE METINGEN FCEV BUS

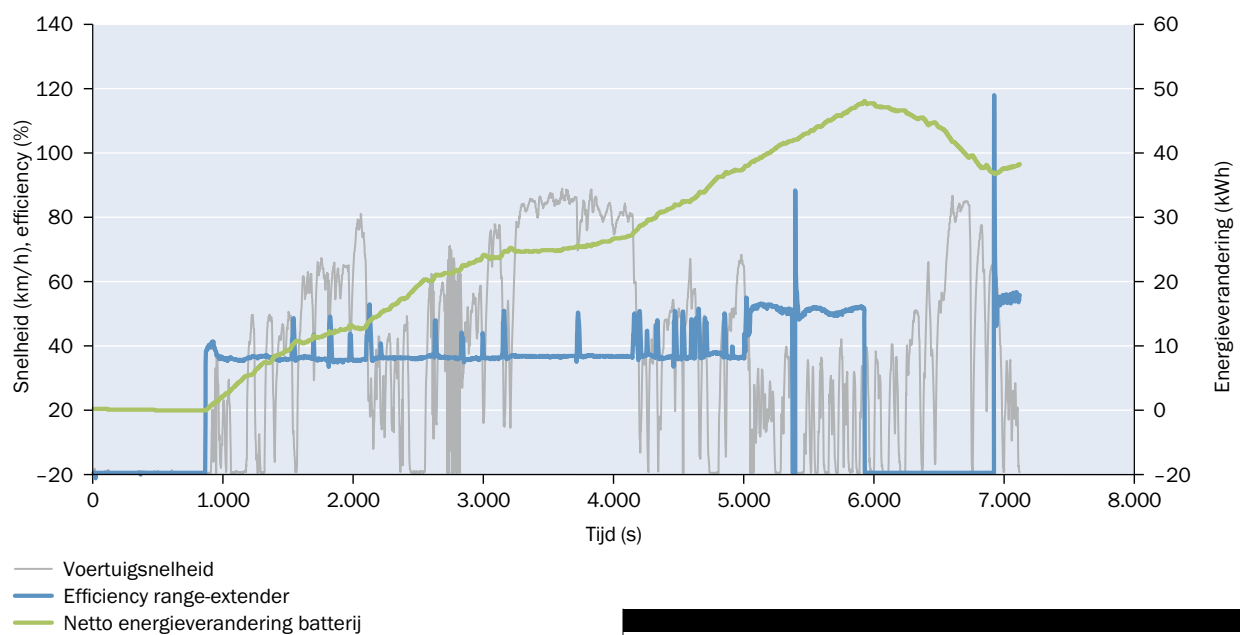
## LIJN 20/22

	Gemiddeld rendement range-extender (%)	H <sub>2</sub> verbruik (bij netto energieverandering = 0) Prototype bus zonder belading (g/km) / (kWh/km)	Gemiddelde snelheid (km/h)
Lijn 20+22	51,1	61 / 2,02	21,4
Deel 1	51,4	61 / 2,03	18,6
Deel 2	50,5	63 / 2,10	23,0
Deel 3	51,4	58 / 1,93	24,7



### RESULTATEN EXPERIMENTELE METINGEN FCEV BUS: REFERENTIERONDE, START MET EEN LEGE BATTERIJ, HOOG VERMOGEN H<sub>2</sub> STACK

Wanneer met een lege batterij gestart wordt, zal de range-extender met de waterstofstack de tractiebatterij van de bus laden naar een SOC van ongeveer 80%. Tijdens deze fase is het energieverbruik hoog, maar effectief neemt de hoeveelheid energie in de batterij ook fors toe. Wat opvalt bij deze situatie is dat het hoge vermogen dat wordt opgelegd aan de waterstofstack, om in energie voor tractie te voorzien en de batterijlading weer op niveau te brengen, gebeurt met een lager rendement van de range-extender (37%) dan wanneer de stack alleen in energie voor tractie moet voorzien, zie de metingen op lijn 20/22 (52%). Het hoge vermogen zorgt dus voor een verlaging van het rendement van de range-extender met de waterstofstack. In hoeverre dit effect ook speelt in praktijksituaties, bijvoorbeeld bij het rijden met een volle bus en een hoog verbruik van bijvoorbeeld een airco, is nog onduidelijk.

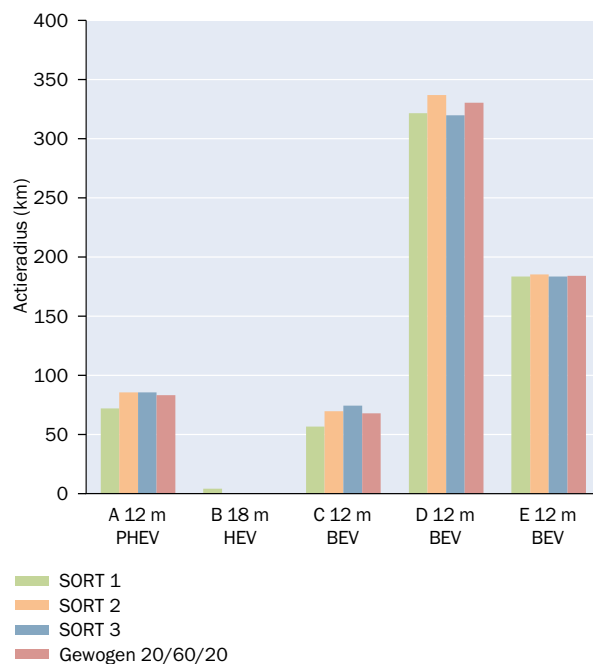


## AUTONOME ACTIERADIUS

### Schatting gebaseerd op SORT en volledige ontladen van de batterij

De PHEV en de BEV bussen hebben een aanzienlijke ZE actieradius. De HEV met zijn kleine batterij blijft duidelijk achter. Bovendien is de ZE functionaliteit voor deze bus beperkt tot een maximum snelheid van 30 km/h.

Doorgaans wordt voor een batterij een ondergrens gehanteerd voor het ontladen. **Hierdoor kan in de praktijk de actieradius lager uitpakken dan wanneer uitgegaan wordt van de maximale hoeveelheid energie die uit de batterij gehaald kan worden (wat niet goed is voor de levensduur van de batterij).** Bij testen verschillen de definities voor het bepalen van de range of batterijcapaciteit. Van belang is dus om altijd te informeren naar de capaciteit van een batterij die in de praktijk beschikbaar is.

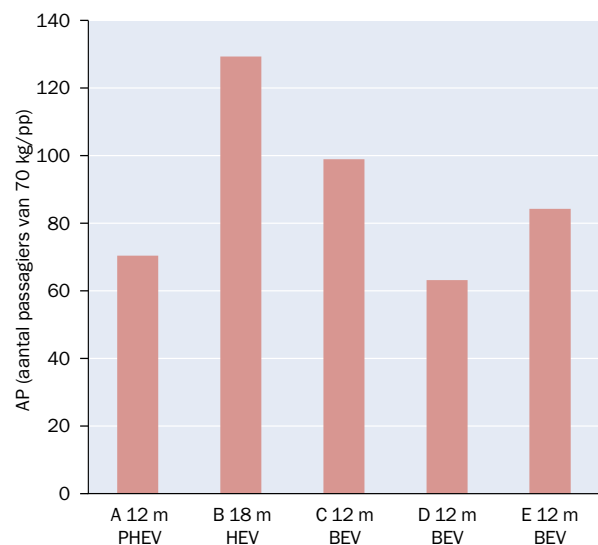


## PASSAGIERS-CAPACITEIT

De passagierscapaciteit is gebaseerd op het ledige gewicht van het voertuig in bedrijfsklare toestand en de technisch maximaal toelaatbare massa van het voertuig. Het verschil tussen beide bepaalt hoeveel passagiers van 70 kg theoretisch aan boord kunnen.

Er is wat verschil tussen de 12 m bussen. De verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door het verschil in ledig gewicht, wat weer voor een groot deel wordt bepaald door het gewicht van de batterij en de aandrijflijn.

Bus A heeft een range-extender aan boord én een relatief grote batterij. Bus D heeft een zeer grote batterij aan boord. Voor beide bussen leidt dit duidelijk tot een lagere passagierscapaciteit. Maar ook de andere BEVs leveren in ten opzichte van een conventionele 12 m dieselbus die doorgaans een capaciteit heeft van rond de 100 passagiers.



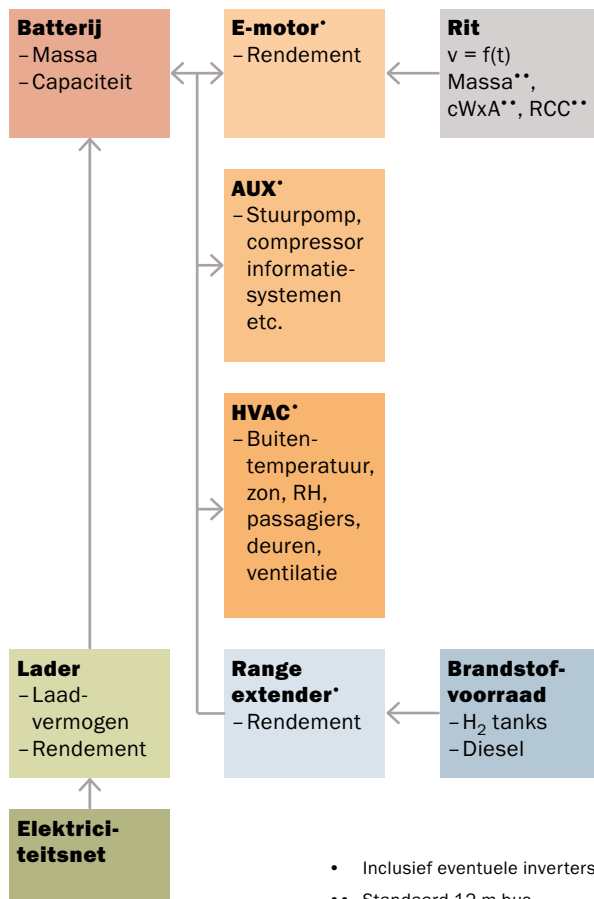
# GENORMALISEERDE RESULTATEN ZE BUSCONCEPTEN

## CONCEPTEN NORMALISEREN

Onder de doorgemeten busconcepten bevonden zich enkele prototypes. Daarom is het moeilijk om een direct vergelijk te maken tussen de busconcepten.

Zo lieten enkele bussen een hoger energieverbruik zien die onder meer werd veroorzaakt door het gebruik van een eenvoudige lader met een laag laadrendement.

Door de concepten te normaliseren kunnen ze goed met elkaar worden vergeleken. Hiervoor zijn de bussen gedecomposeerd in enkele essentiële bouwstenen waarvan voor elk concept de eigenschappen gelijk zijn gemaakt.



## CONCEPTEN

De volgende ZE busconcepten (12 m) zijn gedefinieerd voor het vergelijk van inzetbaarheid:

- **BEV.** Dit aandrijfconcept is volledig ZE.
  - **met relatief kleine batterij van 100 kWh** (in te zetten als bijvoorbeeld spitsbus. Deze is ook in te zetten met gelegenhedsladen, maar dan moet ook rekening worden gehouden met de speciale laadvoorziening (hoogvermogen: inductie, pantograaf, ...) en de effecten daarvan op het energieverbruik en laadtijd. Dit concept behoort echter niet tot de scope van deze studie. Het wordt daarom aanbevolen om dit concept nader te onderzoeken.
  - **met grote batterij van 300 kWh** (in te zetten als stadsbus).
- **PHEV met een batterij van 100 kWh** voor het beschikbaar hebben van ZE actieradius in de stad en een diesel range-extender voor het volbrengen van de dagelijkse inzet in het buitengebied.
- **FCEV met een waterstof-elektrische serie hybride aandrijving.** Dit concept is volledig ZE. De energie wordt opgewekt uit de getankte waterstof aan boord van het voertuig.

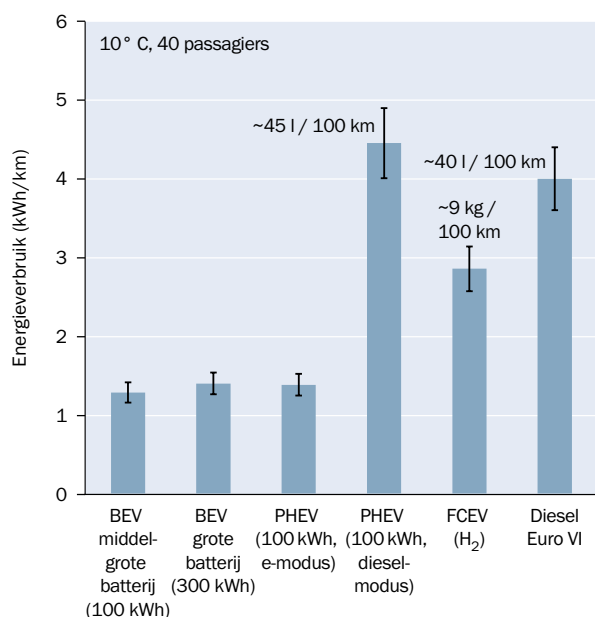
# ENERGIE-VERBRUIK OP VOERTUIGNIVEAU (TTW)

## INCLUSIEF ON-BOARD LADER VOOR DE BEV EN DE PHEV

Er zijn geringe verschillen tussen de BEV's en de PHEV in elektrische modus. De BEV met grote batterij en de PHEV verbruiken iets meer energie dan de BEV met kleine batterij omdat ze zwaarder zijn door de grotere batterij (BEV) en de range-extender (PHEV). De effecten van die extra massa zijn niet heel groot (~10%) omdat een deel ook weer wordt teruggewonnen d.m.v. regeneratief remmen.

De PHEV in range-extendermodus en de FCEV hebben een hoog energieverbruik omdat deze de energie aan boord opwekken. De PHEV heeft een hoger energieverbruik dan de FCEV omdat bij de laatste de energie aan boord met een hoger rendement wordt opgewekt in de brandstofcel (40-50%) dan in de dieselmotor met generator (25-30%).

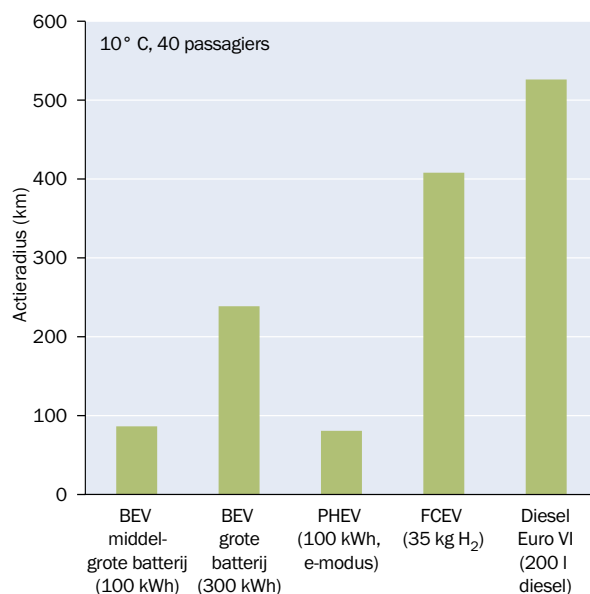
Tijdens de metingen zijn resultaten gevonden die soms een omgekeerd beeld lieten zien. Een bus met een grotere batterij had in een enkel geval een lager energieverbruik dan een bus met een kleinere batterij. Het verschil werd veroorzaakt op componentniveau in de bus. Dit soort effecten maakt een testmethode als de SORT belangrijk omdat daarmee het meest efficiënte concept kan worden gekozen.



# AUTONOME ACTIERADIUS

De autonome 'Zero Emissie' actieradius varieert logischerwijs sterk per concept.

Voor een BEV en PHEV wordt de ZE actieradius bepaald door de beschikbaar gestelde capaciteit van de batterij en het energieverbruik uit de batterij voor gegeven rijcondities. De capaciteit van een batterij wordt echter lager over de levensduur. Daarbij worden batterijen of tanks nooit helemaal leeggereden. Daarom moet rekening worden gehouden met een extra marge. Voor een FCEV wordt de actieradius bepaald door de nuttige capaciteit van de waterstoftanks en het waterstofverbruik voor gegeven rijcondities. Bij het geteste prototype zijn 5 tanks geplaatst van zo'n 200 l die bij 350 bar elk ongeveer 5kg waterstof kunnen bevatten (samen 25kg). Doorgaans worden enkele tanks meer geplaatst om de actieradius te vergroten. In de brochures worden totale tankcapaciteiten van rond 30-40kg genoemd voor 12m FCEV bussen. De doelstelling is vaak om per dag maximaal 1 keer te moeten tanken.



## LAADTIJD, LAADVERMOGEN

De doorgemeten BEV en de PHEV waren alle voorzien van een onboard batterijlader. De laders laden de lithium-ion batterijen met een gematigde laadsnelheid die tussen de bussen varieert van zo'n 0,15 tot 0,2 C, ofwel ongeveer een vijfde deel tot een zevende deel van de capaciteit van de batterij per uur. Daarmee is een batterij in vijf tot zeven uur van helemaal leeg tot helemaal vol opgeladen. Vanzelfsprekend neemt de laadtijd af en daarmee de inzetbaarheid toe bij hogere laadvermogens.

## PASSAGIERS- CAPACITEIT

Een ZE bus heeft een andere aandrijflijn dan een conventionele dieselbus en kan daardoor een ander ledige massa hebben. Dit heeft implicaties voor het maximale laadvermogen en dus voor het maximum aantal passagiers, omdat doorgaans de maximaal technisch toelaatbare massa's vastliggen (door de maximale aslasten).

Een ZE bus met volledig elektrische aandrijflijn kan een vergelijkbare massa hebben als een conventionele dieselbus, zo blijkt uit de doorgemeten ZE concepten. Een concept met een relatief kleine batterij aan boord (80kWh) had een rijklaar gewicht van 11,7 ton wat net wat meer is dan dat van een conventionele dieselbus van ongeveer 11,3 ton.

Het gemeten ZE concept met de grote batterij (324 kWh) heeft een ledige massa van 14,2 ton. Het verschil in batterijcapaciteit met de ZE bus met kleine batterij (rond 90 Wh/kg voor het toegepaste batterijtype LFP) vertaalt zich in een verschil in massa van ruwweg 2,5 ton, ofwel 36 passagiers van 70 kg!

Het ZE concept met diesel range-extender (PHEV) moet ook aan passagierscapaciteit inleveren. Deze bus weegt leeg 13,7 ton en daarmee levert de bus een capaciteit van ongeveer 30 passagiers in.

De passagierscapaciteit is gebaseerd op het ledige gewicht van het voertuig in bedrijfsklare toestand en de technisch maximaal toelaatbare massa van het voertuig. Het verschil tussen beide bepaalt hoeveel passagiers van 70 kg theoretisch aan boord kunnen.

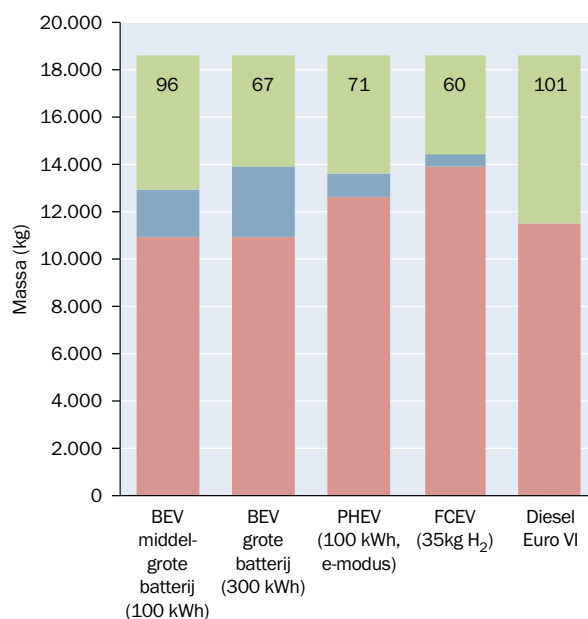
Er is wat verschil tussen de 12 m busconcepten. De verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door het verschil in ledig gewicht, dat weer voor een groot deel wordt bepaald door het gewicht van de aandrijflijn en de batterij.

- De PHEV heeft een range-extender aan boord én een relatief grote batterij.
- De BEV met grote batterijcapaciteit heeft een zware batterij aan boord.
- De FCEV heeft een of meerdere brandstofcel stacks en H<sub>2</sub> opslag tanks en een batterij en is daardoor relatief zwaar.

Voor deze bussen leidt dit duidelijk tot een lagere passagierscapaciteit. Vergelijk dit met een standaard 12 m dieselbus: deze weegt in rijklaar toestand rond 11,3 ton en kan rond de 100 passagiers meenemen.

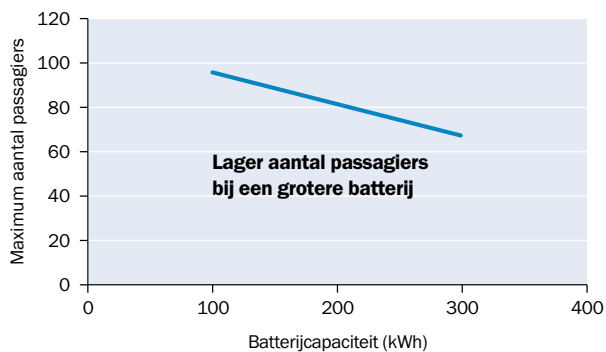
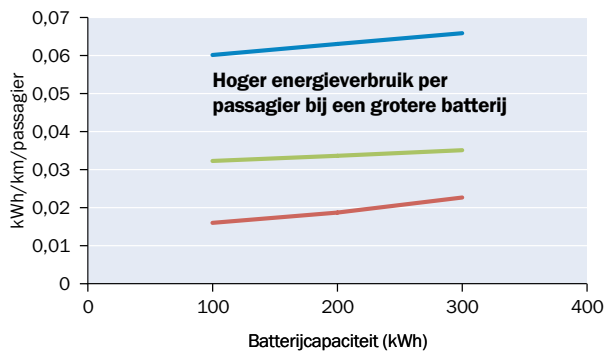
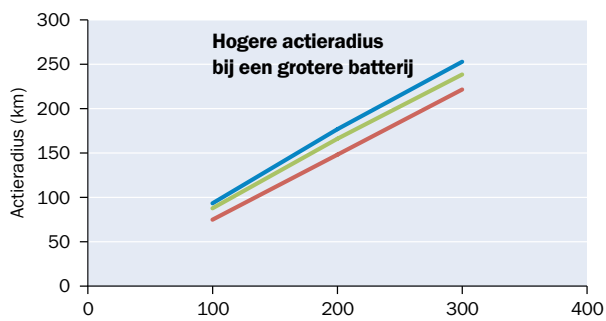
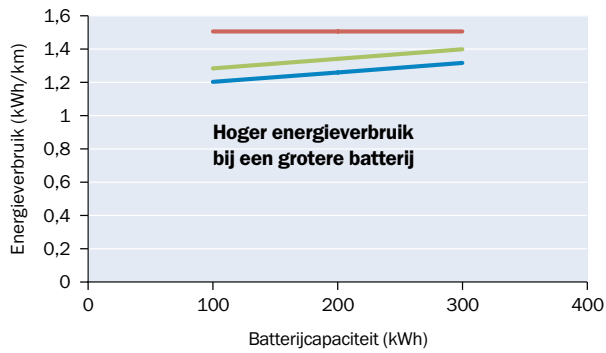
### VLOEROPPERVERLAK

In het geval van de PHEV levert de bus nog wat vloeroppervlak in vanwege de plaatsing van de range-extender achterin de bus. Er blijft voldoende oppervlak over om de toch al iets ingeperkte capaciteit aan passagiers te kunnen herbergen. De FCEV heeft met zijn brandstofcel (200 liter per 100 kW) naar verwachting wat minder ruimte en dus vloeroppervlak nodig. De H<sub>2</sub>-tanks liggen doorgaans op het dak.



- Resterende massa (en aantal passagiers van 70kg)
- Batterij
- 12 m bus met aandrijflijn

# BATTERIJ\* TRADE-OFFS



- 20 passagiers
- 40 passagiers
- Vol

\* Lithium batterij (LiFePo bij ~90 tot 100Wh/kg)



# INVLOEDSFACTOREN

## DE NEDERLANDSE PRAKTIJK

### De meetresultaten van het energieverbruik gelden slechts voor standaard (test) condities van de SORT test.

Een aantal factoren hebben in de praktijk nog veel invloed op de inzetbaarheid. Daarom is een modelmatige aanpak gekozen om de effecten te bepalen voor de Nederlandse praktijk, bovenop de meetresultaten.

Er is een korte studie gedaan om te kijken welke variabelen een grote invloed kunnen hebben op de inzetbaarheid van ZE bussen in de Nederlandse praktijk. Van de variabelen met de meeste invloed wordt uitgerekend hoe groot het effect kan zijn op de inzetbaarheid in Nederland.

De belangrijkste variabelen, met potentieel de grootste invloed op de inzetbaarheid voor wat betreft 'actieradius', 'energieverbruik' en indirect dus ook op 'laadtijd' zijn:

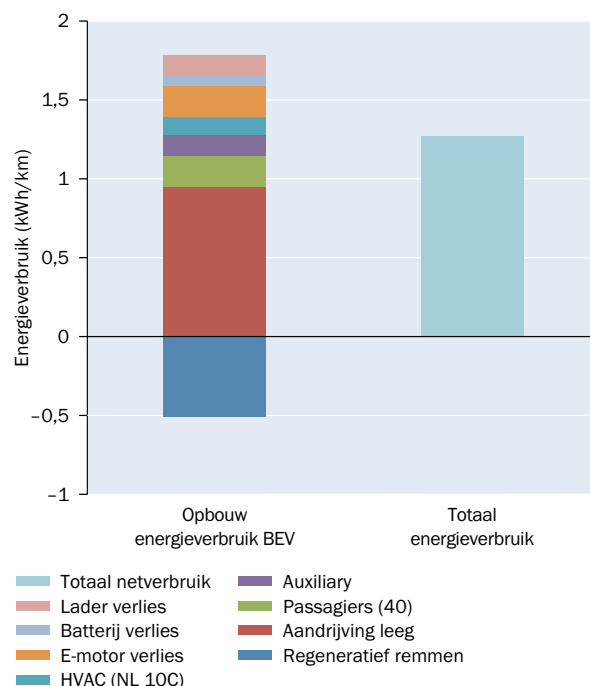
- klimaat
- buslijn/rit:
  - type buslijn: van binnenstad tot buitengebied (belangrijk voor ZE eis in de stad)
  - verkeer: van spits (*traffic forced*) tot *free flow*
  - haltering
- rijstijl
- belading/passagiers.

Elke invloedsfactor wordt hierna uitgebreid besproken en de effecten ervan op de inzetbaarheid worden modelmatig doorgerekend voor gemiddelde omstandigheden maar ook voor extreme, *best* en *worst case* omstandigheden.

## OPBOUW ENERGIE-VERBRUIK BEV

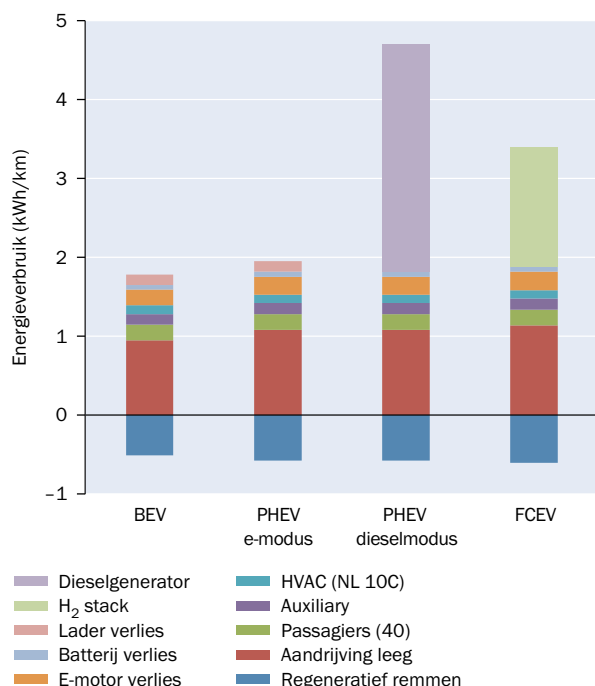
Hieronder wordt met een voorbeeld geïllustreerd hoe het stekkerverbruik van een batterij-elektrische bus is opgebouwd van een 12 m bus die rijdt onder standaardcondities (10° C, 40 passagiers). Een groot deel van de energie is nodig voor de aandrijving van het voertuig, maar een flinke fractie daarvan kan worden teruggewonnen door regeneratief remmen. Een relatief groot deel van het totale energieverbruik komt voor rekening van verliezen in de aandrijving en hulpsystemen zoals het klimaatsysteem, de compressor, de stuurbomp, informatiesystemen en dergelijke.

Voorts kan een lader met een laag rendement veel invloed hebben op het uiteindelijke verbruik. Vanzelfsprekend zijn de rendementen van de elektromotor, de omvormers en de batterij van groot belang.



# OPBOUW ENERGIE-VERBRUIK BEV, PHEV EN FCEV

Hieronder wordt met een voorbeeld geïllustreerd hoe het stekkerverbruik van een BEV, PHEV in elektrische modus, een PHEV in dieselmodus en een FCEV zijn opgebouwd. De PHEV in dieselmodus en de FCEV wekken de benodigde elektrische energie voor de aandrijving aan boord op. Daarmee neemt het energieverbruik (diesel en waterstof) **op voertuigniveau** fors toe.



# KLIMAAT

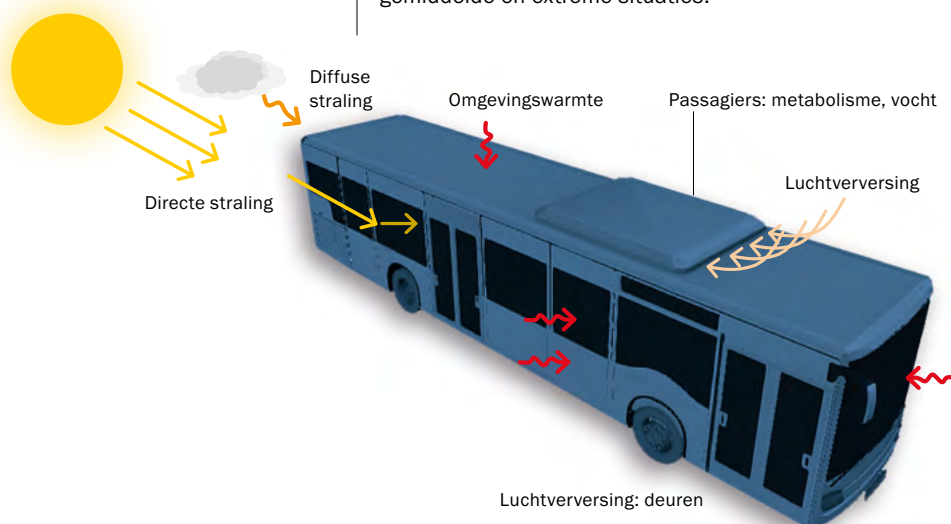
Omgevingstemperatuur en zonnestraling kunnen een grote invloed hebben op het vermogen dat een klimaatsysteem aan boord nodig heeft om een zeker niveau van comfort te bieden aan de passagiers en de chauffeur (koelen verwarmen, ventileren). Als een dergelijk systeem zijn energie van de batterij moet betrekken kan dat een significante invloed hebben op de actieradius en het energieverbruik. De effecten van het klimaatsysteem worden zijn doorgerekend met een thermisch model en een voertuigmodel.

Klimaatsystemen voor elektrische bussen zijn volop in ontwikkeling. De ontwikkelingen zijn voornamelijk gericht op het verminderen van het energieverbruik en vinden voornamelijk plaats op het gebied van bijvoorbeeld warmtepompen, geavanceerde regelingen (bijvoorbeeld voor ventilatie en recirculatie, het combineren met het thermisch management van de batterij) en zaken die de warmte of koeltevraag moeten verminderen, zoals isolatie en zonnewering.

N.b. De omgevingstemperatuur kan ook nog invloed hebben op de effectieve capaciteit van een tractiebatterij. Bij extreme koude daalt de capaciteit. Op dit effect wordt niet nader ingegaan.

## OMGEVINGSTEMPERAATUUR EN ZONNESTRALING

Het ontwikkelde thermische model houdt rekening met de praktijkvariatie van externe factoren: metabolisme (aantal passagiers), zonnestraling en stand, buitentemperatuur en luchtvochtigheid, warmte-uitwisseling, luchtverversing. Het model kan de energievraag voor het genereren van warmte of koude uitrekenen voor de Nederlandse praktijk. Hierna volgen enkele voorbeelden die de invloed illustreren in gemiddelde en extreme situaties.



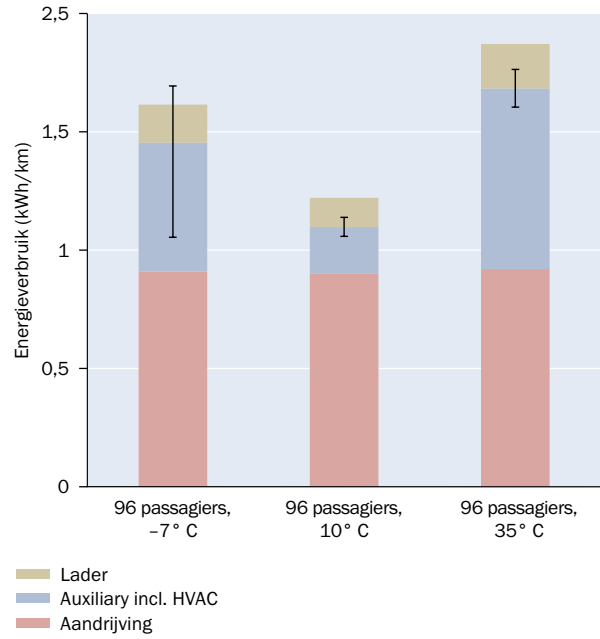
**Invloed van HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning) op het energieverbruik van een BEV (12 m bus)**

De energiebehoefte voor koelen ventileren en verwarmen heeft een direct effect op het energieverbruik van de bus en beïnvloedt daarmee (omgekeerd) evenredig de actieradius van de bus. Hieronder is een voorbeeld gegeven van het energieverbruik van een volle 12 m batterij-elektrische bus voor:

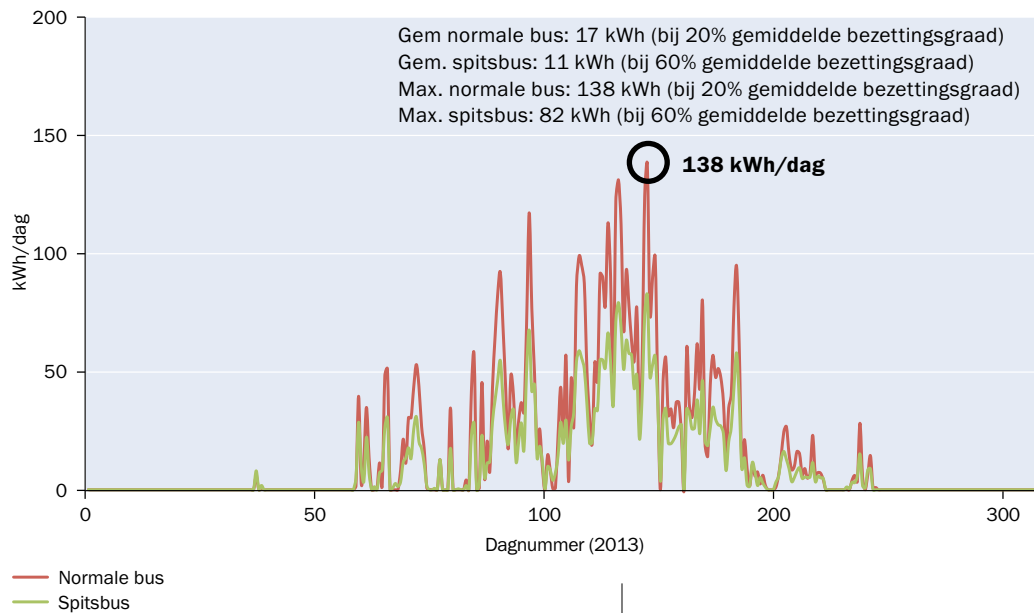
- koelen en ventileren bij -7° C
- de gemiddelde situatie in Nederland
- verwarmen en ventileren bij 35° C.

De energiebehoefte neemt fors toe voor zowel verwarmen (+40%) als koelen (+60%). De waarden zijn, gegeven de gekozen omgevingscondities, te bestempelen als extremen. De energiebehoefte varieert in de praktijk van uur tot uur en dag tot dag. Zie volgende pagina's.

Er is nog onzekerheid over het meerverbruik door verwarmingssystemen omdat deze volop in ontwikkeling zijn.



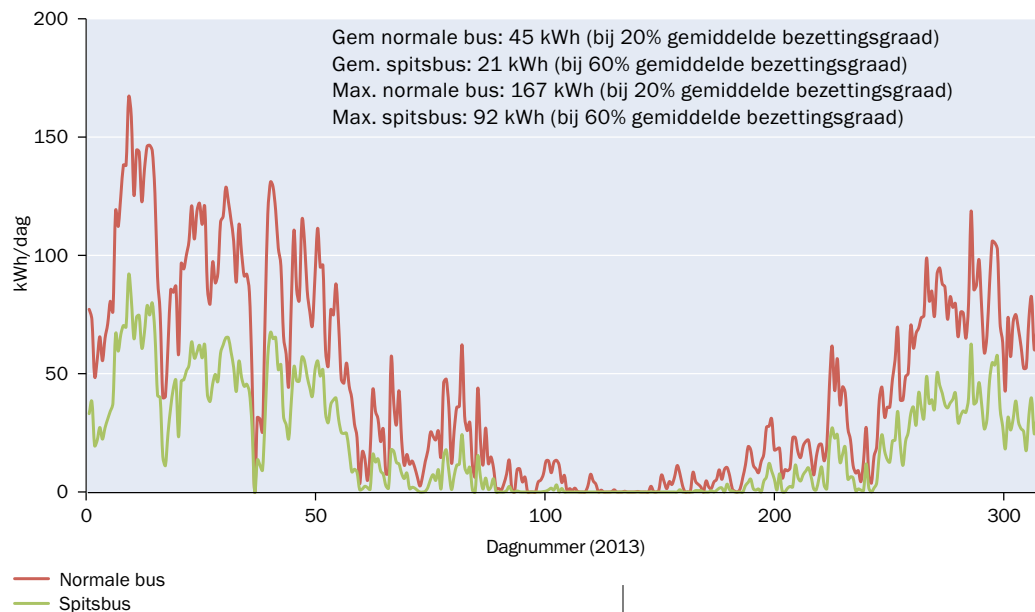
Voorbeeld van de energievraag voor het **koelen en ventileren** in kWh per dag in 2013



Een normale bus die de hele dag (5:00-01:00) wordt ingezet en een gemiddeld aantal passagiers van 20% (van de passagierscapaciteit) vervoert, heeft in de zomer op de heetste dag maximaal 138 kWh per dag nodig om te koelen tot 20° C (interieur) en heeft gemiddeld per dag 17 kWh nodig om te koelen.

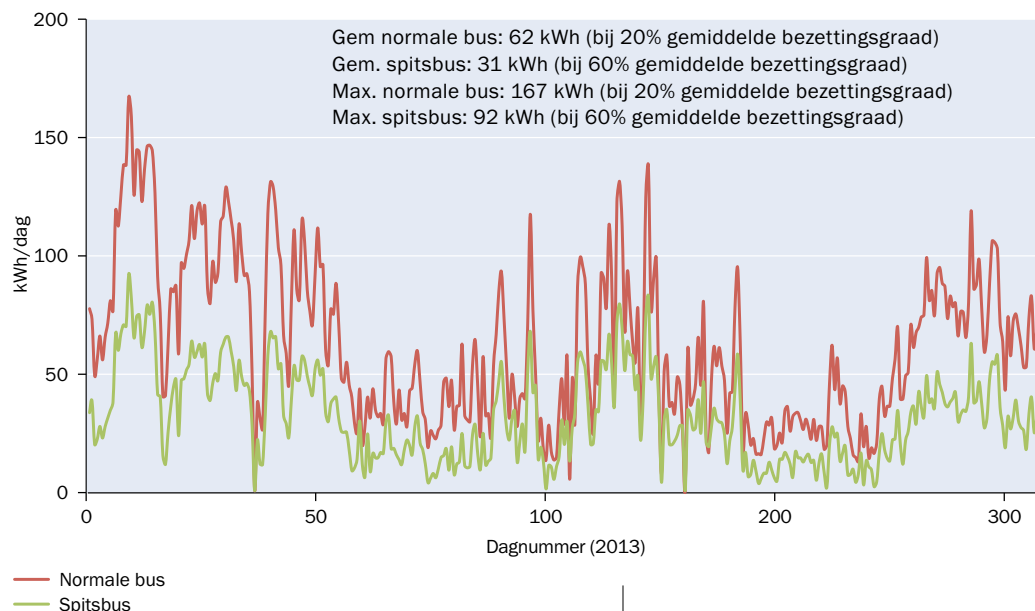
Voorbeeld van de energievraag voor het **elektrisch verwarmen en ventileren** in kWh per dag in 2013.

Nb. Een elektrische verwarming heeft een relatief lage COP. Deze kan hoger zijn in het geval van een warmtepomp.



Een spitsbus die alleen tijdens de spitsen wordt ingezet en een gemiddeld aantal passagiers van 60% vervoert, heeft in de winter op de koudste dag maximaal 92 kWh per dag nodig om te verwarmen tot 20° C (interieur) en heeft gemiddeld per dag 21 kWh nodig om te verwarmen.

Voorbeeld van de energievraag voor het **elektrisch koelen, verwarmen en ventileren** in kWh per dag in 2013



## BELADING, RIJSTIJL, RIT

De belading (het gezamenlijke gewicht van de passagiers) heeft invloed op het energieverbruik van een ZE bus. Hoe hoger het gewicht van het voertuig hoe meer vermogen moet worden geleverd voor de rolweerstand en voor het accelereren. ZE concepten met een elektrische aandrijving hebben echter de mogelijkheid om regeneratief te remmen om op die manier kinetische energie terug te winnen. Bij een hogere voertuigmassa kan theoretisch ook meer energie teruggewonnen worden. Wat het effect is, van belading is op het energieverbruik en dus de actieradius van een ZE bus, wordt in de sheets hierna besproken.

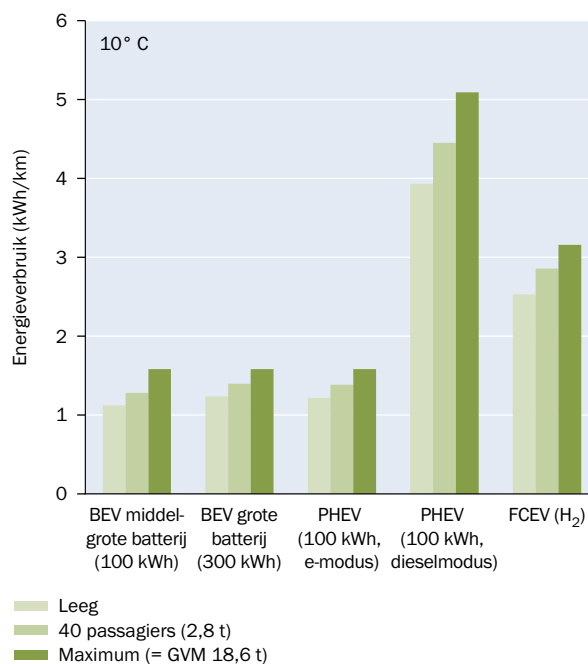
Naast belading hebben de rit en de rijstijl invloed op het energieverbruik van een ZE bus. Voor conventionele voertuigen is hier veel naar onderzoek gedaan. Voor benzine en dieselvoertuigen heeft dit onder meer geleid tot de rijstijltips van Het Nieuwe Rijden. Voor elektrische aandrijvingen is nog weinig bekend hoe zuinig gereden kan worden en wat het potentieel ervan is. Ook van de invloed van de rit zelf is weinig bekend. Net als bij conventionele voertuigen spelen ook fysische factoren (de rol- en luchtweerstand, massatraagheid en helling) een belangrijke rol, maar bij ZE voertuigen is de aandrijflijn totaal verschillend. Daarom is een verkennend onderzoek gedaan met de meetgegevens van de bussen om te bepalen of er relaties zijn te vinden tussen rit, rijstijl enerzijds en energieverbruik anderzijds.

## BELADING, AANTAL PASSAGIERS

Met het toenemen van de massa neemt ook het energieverbruik (kWh/km) toe. Dat is te verklaren doordat de rolweerstand toeneemt en ook omdat er meer vermogen nodig is om de grotere massa in beweging te krijgen;

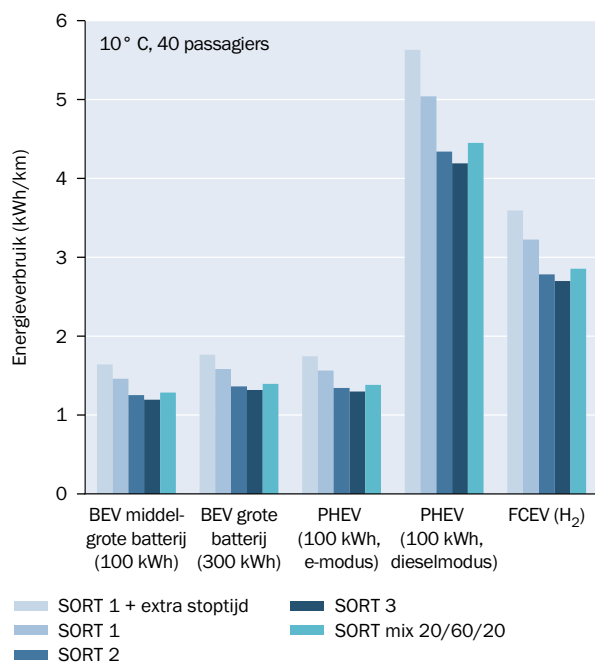
Meer massa betekent echter ook dat er meer energie kan worden geregenereerd. Maar met het toenemen van het benodigde remvermogen neemt het vermogen om te regenereren uiteindelijk af. Dat komt omdat er beperkingen in het regeneratief vermogen zijn (in de praktijk is de motorstroom gelimiteerd. Daarnaast nemen ook de ohmse verliezen (batterij, kabels, motor) met het kwadraat van de benodigde stroom toe). Zie ook paragraaf over rijstijl).

Het energieverbruik van een BEV bus is door het regenereren van remenergie minder gevoelig voor een toename in massa dan een dieselbus. Voor een dieselbus is de toename in energieverbruik ongeveer 0,15-0,19 kWh/km/ton, voor een 12 m BEV bus is dat ongeveer 0,05-0,08 kWh/km/ton.



# RIT

Het type SORT rit heeft invloed op het energieverbruik. SORT 1, welke gekarakteriseerd wordt door een lage gemiddelde snelheid, heeft het hoogste verbruik. Wanneer de haltering en daarmee de stoptijd toeneemt, neemt tevens het energieverbruik toe. Dit is geïllustreerd in de onderstaande figuur door 'SORT1 + extra stoptijd'. Hier is de stoptijd tijdens SORT 1 verdubbeld. De verhoging van het energieverbruik komt door het energieverbruik van de systemen die bij stilstand actief zijn. Wanneer er grote verbruikers zijn, zoals een klimaatsysteem, dan neemt dit effect verder toe.

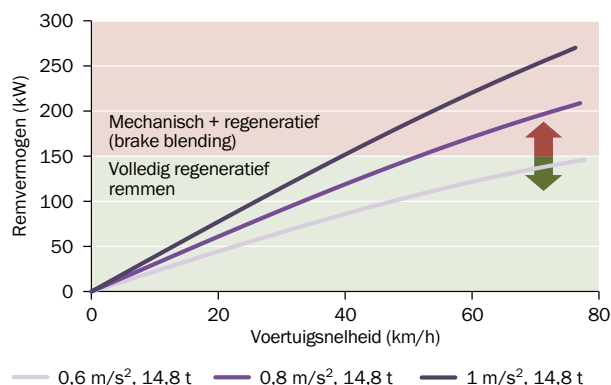
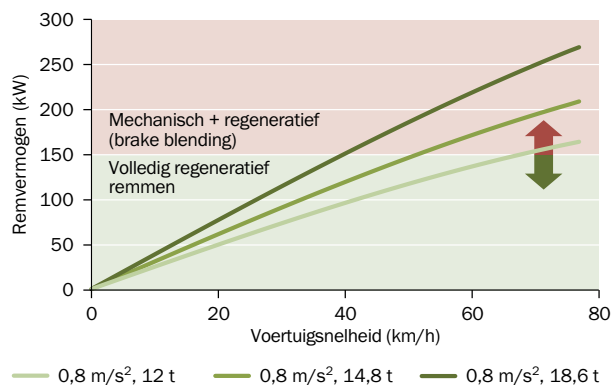


# RIJSTIJL, REGENERATIEF REMMEN

Met regeneratief remmen kan tot ongeveer 30% remenergie worden teruggewonnen.

De hoeveelheid remenergie die kan worden teruggewonnen wordt theoretisch beperkt door het elektrische vermogen van de tractiemotoren. Boven het maximale remvermogen van de tractiemotoren wordt deels elektrisch en deels mechanisch geremd. Dit heet 'brake blending'. Daarnaast nemen bij hoge remvermogens de ohmse verliezen toe en daardoor neemt de geregenereerde hoeveelheid energie af. Voor een zuinige rijstijl moet brake blending zoveel mogelijk worden vermeden.

In onderstaande figuren is het benodigde remvermogen weergegeven voor verschillende beladingsgraden en voor verschillende deceleraties. Daarbij is het motorvermogen van twee tractiemotoren gezamenlijk vastgelegd op 150 kW. Daarboven wordt dus elektrisch en mechanisch geremd. Duidelijk is te zien dat bij hoge snelheden, hoge belading en hoge deceleraties energie verloren zal gaan door mechanisch 'bij te remmen'. De snelheid is ook belangrijk; uit de figuren volgt dat bij lager wordende snelheid harder geremd kan worden zonder dat veel energie verloren gaat.



# PRAKTIJKVOORBEELDEN

Voor de ZE busconcepten zijn een aantal voorbeeld-casussen gedefinieerd. Het doel is om te illustreren wat de inzetmogelijkheden van de concepten zijn en hoe – voor een paar sprekende voorbeelden – de inzetbaarheid wordt beïnvloed.

**BEV, volledig ZE** met als belangrijkste keuzemotivatie volledig ZE en met als belangrijkste inzetbaarheidscriteria actieradius en laadtijd voor de volgende typische voorbeelden:

- stadsbus, inzet gedurende de hele dag (20 uur, van 5:00 tot 01:00)
- spitsbus, inzet alleen tijdens de twee spitsen met een gezamenlijke inzet van 7 tot 8 uur per dag.

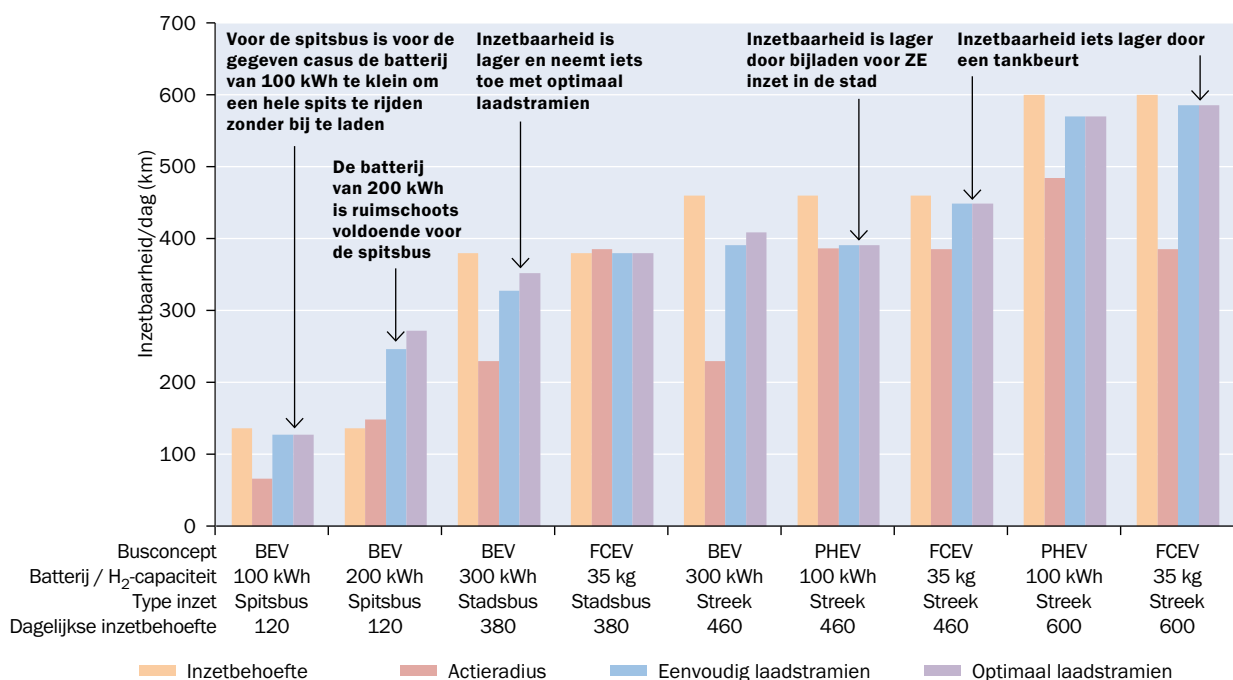
**PHEV, part time ZE, volledig ZE in stedelijke omgeving** met als belangrijkste keuzemotivatie ZE in stedelijke omgeving en hogere dagelijkse kilometrages door inzet in het buitengebied (niet ZE). Er wordt vanuit gegaan dat een middelgrote batterij (100 kWh) is geplaatst en dat tussentijds wordt bijgeladen door de range-extender.

**FCEV, volledig ZE** met als belangrijkste keuzemotivatie inzetbaarheid voor hoge dagelijkse kilometrages en ZE.

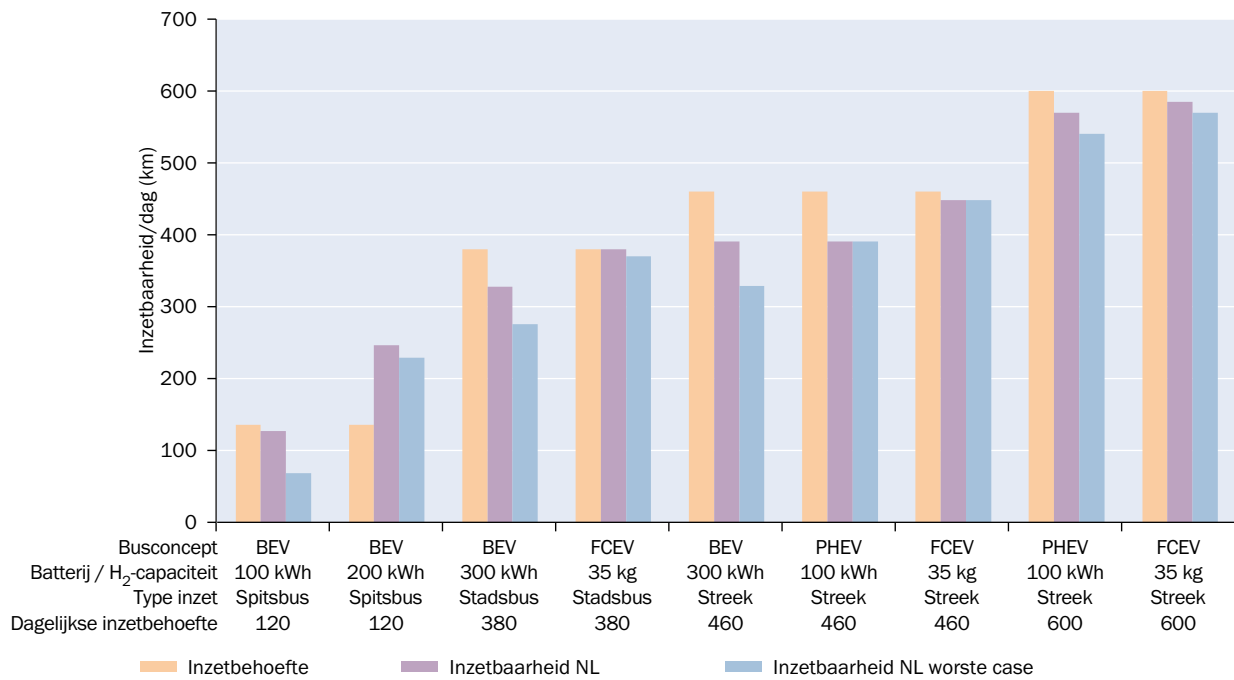
Voor verschillende typen inzet is de theoretische inzetbaarheid (in km/dag) berekend van de verschillende ZE of part-time ZE concepten. De inzetbaarheid van de busconcepten kan worden vergeleken met de inzetbehoefte. Voor de bepaling van de inzetbehoefte is de dieselbus als uitgangspunt genomen en zijn aannames gedaan ten aanzien van de dagelijkse inzetduur, gemiddelde snelheid en daarmee de theoretische inzetbehoefte in km/dag. Er zijn drie situaties doorgerekend:

1. Inzetbaarheid in km/dag zonder bijladen: 's nachts laden (pure actieradius).
2. Inzetbaarheid in km/dag met eenvoudig laadstramien: 's nachts laden, volledig leegrijden, telkens volledig opladen.
3. Inzetbaarheid in km/dag met optimaal stramien: 's nachts laden, bijladen wat (naar verwachting) nodig is.

Er is gerekend met pure laadtijd en vultijd in het geval van waterstof. Er is geen rekening gehouden met extra tijd voor omrijden en handling. Er is rekening gehouden met een thuiscommarge van 20 kWh en 2 kg H<sub>2</sub>.



In extreme situaties neemt de inzetbaarheid in km/dag af door het hogere energieverbruik uit de batterij. Denk aan warme zomerdagen met een hoge passagiersbezetting en druk verkeer. De inzetbaarheid neemt niet af in de mate waarin de actieradius afneemt. Er kan tussentijds worden bijgeladen en de extra tijd die het kost om de meerverbruikte energie bij te laden is naar verhouding laag. Sneller laden vermindert daarom de impact van meerverbruik.





# CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

## CONCLUSIES

TNO heeft een aantal belangrijke parameters vastgesteld die de inzetbaarheid van zero emissie bussen bepalen. Daarna zijn van zes bussen deze parameters onder Nederlandse omstandigheden gemeten. Met deze informatie kan TNO uitspraak doen over de inzetbaarheid van de verschillende typen bussen in de Nederlandse praktijk.

De doorgemeten zero emissie bussen zijn nog niet voor elk soort inzet geschikt. Wel bestaat voor de komende jaren veel potentie voor een forse verbetering van de inzetbaarheid van zero emissie bussen.

Per situatie zal bepaald moeten worden welk concept met bijbehorende specificaties het beste geschikt is. Een mogelijkheid is om ZE busvervoer stapsgewijs in te voeren, aan te vangen bij die situaties waarbij ZE busconcepten reeds voldoen aan de inzetbehoefte. Op deze wijze kan ervaring met het concept worden opgedaan en kan het concept fungeren als stepping stone naar volledig ZE busvervoer.

De meest bepalende specificaties van een concept die van invloed zijn op de inzetbaarheid zijn; energieopslag (elektrisch, waterstof), laadsnelheid, laadinfrastructuur, energieverbruik en passagierscapaciteit.

In de praktijk hebben – naast de specificaties van een concept – de volgende variabelen de grootste impact op de inzetbaarheid waar rekening mee dient te worden gehouden:

- klimaat
  - belading
  - type rit
  - rijstijl
- **Klimaat** – Buitentemperatuur en zonnestraling hebben de grootste impact op het energieverbruik en actieradius (tot zo'n 60% extra). Energie die nodig is voor het ventileren, koelen en verwarmen van een bus. Efficiëntere systemen zijn vol op in ontwikkeling, evenals technische maatregelen om de warmte- of koude vraag aan boord van een bus te kunnen verlagen.

- **Belading** – Belading is het gezamenlijke gewicht van de passagiers. De impact van belading op het energieverbruik is significant (tot 40%). Een bus met elektrische aandrijving is hier minder gevoelig voor dan een dieselbus. Dit komt doordat een deel van de extra energie bij een voertuig met elektrische aandrijving ook weer kan worden teruggewonnen.
- **Rit** – Een bus met elektrische aandrijving is minder gevoelig voor het type rit in vergelijking met een conventionele dieselbus. Veel dynamiek (zoals in een stadsrit met veel stoppen en optrekken) is ongunstig voor een dieselbus. Veel energie gaat verloren bij het remmen, wat een elektrische bus deels kan terugwinnen (tot zo'n 40%) en in de dieselmotor, die een relatief laag rendement heeft ten opzichte van een elektrische aandrijving.
- **Rijstijl** – De invloed van rijstijl op het energieverbruik is bij bussen met een elektrische aandrijving anders dan bij conventionele dieselbussen. Dit komt doordat het energieverbruik niet meer zoveel beïnvloed wordt door de bediening van het gaspedaal, maar voornamelijk door hoe het rempedaal wordt bediend. De chauffeur heeft hierop een grote invloed (tot 30%). Een rijstijlhulp aan boord van het voertuig kan daarbij helpen.

Om specificaties van een ZE bus in de praktijk te bepalen, blijkt dat de UITP SORT testprocedure een goed uitgangspunt is. Middels toegepaste aanvullingen op de bestaande SORT testmethodiek kunnen specificaties als energieverbruik, waterstofverbruik, batterijcapaciteit en laadsnelheid worden bepaald. De SORT uitkomsten van dezelfde ZE concepten kunnen met elkaar worden vergeleken.

De SORT procedure heeft ook beperkingen.

- Accessoires die van invloed zijn op het energieverbruik als verwarming, airco en luchtcompressor worden niet of maar beperkt meegenomen. Hiertoe moeten alsnog aanvullende testen worden uitgevoerd.
- De strategie van de fabrikant voor het terugwinnen van remenergie bleek erg gevoelig voor het energieverbruik binnen de toegelaten marges van de ritcyclus. Het wordt aanbevolen om bij de ontwikkeling van aangepaste SORT voor zero emissie busconcepten rekening mee te houden.

Uit de meetresultaten van 6 verschillende ZE bussen kan het volgende geconcludeerd worden:

- Door het hogere gewicht van een batterij met een hogere capaciteit neemt het energieverbruik toe. Deze toename blijft echter enigszins beperkt door verbeterde mogelijkheden voor regeneratief remmen.
- ZE concepten met een grote batterij, een range-extender of op waterstof zijn in vergelijking met conventionele dieselbussen zwaarder, wat ten koste gaat van de passagierscapaciteit. De afname in passagierscapaciteit kan voor een 12 m bus oplopen tot zo'n 35 passagiers (van de 90 tot 100).
- Tijdens de metingen zijn duidelijke verschillen in de efficiëntie van de elektrische aandrijflijn geconstateerd. Middels de SORT procedure was het mogelijk de resultaten met elkaar te vergelijken. Dit maakt een testmethode als de SORT belangrijk omdat daarmee de meest efficiënte bus kan worden gekozen.

## AANBEVELINGEN

In deze studie zijn de momenteel meest relevante busconcepten onderzocht, waarbij de aandacht vooral ging naar bussen met aandrijftechnologie die de afgelopen jaren is ingezet in een aantal pilots in het Nederlandse innovatieve bussenprogramma. Ook komen nieuwe technologie en concepten op de markt die elk nieuwe mogelijkheden bieden ten aanzien van ZE busvervoer. Denk hierbij aan batterijtechnologie, snelladen en gelegenheidsladen. Om op grote schaal ZE busvervoer te implementeren is veel nieuwe kennis nodig omtrent de nieuwe innovatieve systemen die op de markt beschikbaar komen. Het verdient dan ook aanbeveling om structureel nieuwe busconcepten door te meten en de resultaten ter beschikking te stellen aan belanghebbenden. Er moet daarbij onderscheid gemaakt worden tussen een efficiënte en korte gestandaardiseerde meting op basis van SORT en een monitoring van de prestaties onder praktijkomstandigheden.

Een aantal zaken die van belang zijn voor de inzetbaarheid zijn nog niet beschouwd in deze studie. Dit zijn de impact van extreme koude en warmte op de batterijcapaciteit en dus op de actieradius en de impact van veroudering (state of health) van de batterij op de batterijcapaciteit en dus op de actieradius.

Het verdient daarom aanbeveling nieuwe ZE busconcepten te blijven meten/monitoren en tevens onderzoek te verrichten naar de technische kwesties rondom batterij- en brandstofcellen systemen.



# REFERENTIES

**UITP 2014.** UITP project SORT, Standardised On-Road Test cycles, new edition UITP 2014, D/2014/0105/1. This version exceeds and supersedes the 2009 version. In de 2014 versie is een annex opgenomen voor het doormeten van hybride bussen die zelf hun batterijlading op pijl houden.

**SAE J1634.** Battery Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure, revised 2012-10, superseding J1634 OCT2002

**LCEB 2009.** Low Carbon Emission Bus Accreditation Guidelines and annexes containing test protocols for charge sustaining, charge depleting hybrids and battery electric buses.



## ONDERTEKENING

Delft, 30 maart 2015

TNO

Gertjan Koornneef  
Projectleider

Robin Vermeulen  
Auteur

› TNO  
Earth, Life & Social Sciences  
Van Mourik Broekmanweg 6  
2628 XE Delft  
Postbus 49  
2600 AA Delft

TNO.NL

**TNO.NL**