

E-bussen laden zorgt voor nieuw spanningsveld op busstations

Raymond Huisman – Goudappel Coffeng – RHuisman@goudappel.nl

Max Wiercx – TU Delft, DPI – m.wiercx@dutchpi.com

Niels van Oort – TU Delft – N.vanOort@tudelft.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 22 en 23 november 2018, Amersfoort

Samenvatting

Om de bijdrage van transport aan de opwarming van de aarde te minimaliseren en de leefbaarheid in onze woonomgeving te verbeteren groeit de wereldwijde vloot zero-emissiebussen snel. Drie soorten bussen kunnen worden ingedeeld bij 'on the pipe' zero emissiebussen, namelijk trolley-, batterij-elektrische en brandstofcel-elektrische bussen. Er zijn verschillende laadmethoden, verschillende laadsystemen en verschillende aandrijfmogelijkheden om batterijen van elektrische bussen te laden. Ondanks veel ontwikkelingen en toepassingen missen er tot op heden inzichten in de effecten van de introductie van elektrische bussen op de planning en uitvoeringskwaliteit.

Dit paper presenteert een methodiek voor het inzichtelijk maken van deze effecten afhankelijk van verschillende laadmethoden. Een nieuwe simulatiemethode en -model (*VOLTAGE*), gericht op zero-emissiebussen is ontwikkeld om verschillende laadmethoden, laadsystemen en aandrijfmogelijkheden met elkaar te vergelijken. De vergelijking gebeurt op het gebied van kosten en baten, zowel voor OV-autoriteit, vervoerder als reiziger.

Zero emissiebussen dragen bij aan een duurzame en leefbare woonomgeving. Uit dit onderzoek blijkt echter dat inzet van zero emissiebussen ook gepaard gaat met hogere kosten en meer onbetrouwbaarheid van de dienstregeling voor de reiziger. De investeringskosten zijn hoger dan bij 'oude vertrouwde dieselbussen'. Exploitatie met elektrische bussen is tot 70% goedkoper dan dieselbussen, maar deze winst is niet genoeg om de toename in investeringskosten te neutraliseren. Tot op heden is de capaciteit van batterijen onvoldoende om bussen van begin tot einde dienst zonder tussentijds laden in te zetten. Tussentijds laden in de garage kost echter tijd en extra voertuigbewegingen en is daarom onwenselijk. Om die reden is het aan te raden batterijen te laden op busstations.

Onderwerpen: elektrische bussen, laadmethoden, laadstrategieën, effecten op OV-aanbod, investeringen en exploitatiekosten, betrouwbaarheid

1. Hoe het klimaatakkoord van Parijs effect heeft op ons openbaar busvervoer

1.1 Redenen voor energietransitie binnen het openbaar busvervoer

Het klimaatakkoord van Parijs uit 2016 stelt als doel om de opwarming van de aarde tot twee graden Celsius te beperken. De mobiliteitssector is debet aan meer dan een kwart (26%) van het wereldwijde energieverbruik en ongeveer 23% van 's werelds uitstoot van broeikasgassen (Ou et al. 2010). Om de doelen van het klimaatakkoord te halen moet de mobiliteitssector dus 'z'n steentje bijdragen' aan de reductie van brandstofverbruik en daarmee de reductie van broeikasgassen. Zodoende draagt ook het openbaar (bus)vervoer bij aan de opwarming van de aarde. Bijna tachtig procent van de Europese busvloot bestond in 2013 nog uit vervuilende dieselbussen. Het is hoog tijd voor een energietransitie binnen het openbaar busvervoer, aldus het internationale netwerk van openbaar vervoerbedrijven en -instellingen (UITP 2016).

De laatste jaren wordt de busvloot steeds groener: technologische ontwikkelingen enerzijds en een groeiende mate van bewustwording bij stakeholders in de OV-wereld doen de ontwikkeling en de ingebruikname van zero emissiebussen goed. In Nederland moeten vanaf 2025 alle nieuwe openbaar vervoerbussen zero emissie zijn, terwijl in 2030 de gehele vloot zero emissie moet zijn (Rijksoverheid, 2016). Duurzame alternatieven zijn aanwezig in verschillende gedaanten, zoals compressed natural gas (CNG), liquid propane gas (LPG), methanol, dimethyl ether (DME) en elektriciteit (Ou et al., 2010; Tzeng et al., 2005). Rijden op elektriciteit kan middels het gebruik van een brandstofcel (waterstof), een batterij of door infrastructuur tijdens het rijden te gebruiken (trolley). De meerderheid van voorgenoemde alternatieven is weliswaar duurzamer dan diesel, maar niet 'on the pipe' zero emissie. Het gebruik van elektrische bussen is daarmee voorlopig het beste alternatief voor de dieselbus (Tzeng et al., 2005; Topon en Hisashi, 2014; Laizans et al., 2016).

Behalve de wens om een duurzaam alternatief te hebben voor de dieselbussen, spelen ook verstedelijking en de daaruit voortvloeiende noodzaak om openbaar vervoer in te zetten een rol in de toename van interesse in elektrische bussen. Het aantal pilots groeit snel, waarbij Europa en China het voortouw nemen. Literatuur en onderzoek naar ontwikkelingen rondom elektrische bussen is, voor zover bekend bij de auteurs, echter schaars. Dat was de aanleiding voor dit onderzoek naar keuzes omtrent laadmethodes.

Het model dat hiervoor ontwikkeld is, *VOLTAGE*, verschaft inzicht in de keuzes die er zijn qua laadmethodes en laadstrategieën en hoe deze in verschillende omstandigheden functioneren.

1.2 Leeswijzer

Na deze introductie over het nut en noodzaak van zero emissiebussen, wordt het concept 'zero emissiebus' in hoofdstuk 2 nader toegelicht. In dit hoofdstuk komen ook de onderzoeksdoelen naar voren. Hoofdstuk 3 behandelt de onderzoeksmethoden die in hoofdstuk 4 bij de casus (busstation Schiphol) worden toegepast. Tot slot behandelt hoofdstuk 5 conclusies. Uiteraard volgen discussie en aanbevelingen de in hoofdstuk 5 opgenomen conclusies.

2. Zero-emissie bustransport

2.1 Ontwikkelingen en laadmethodes

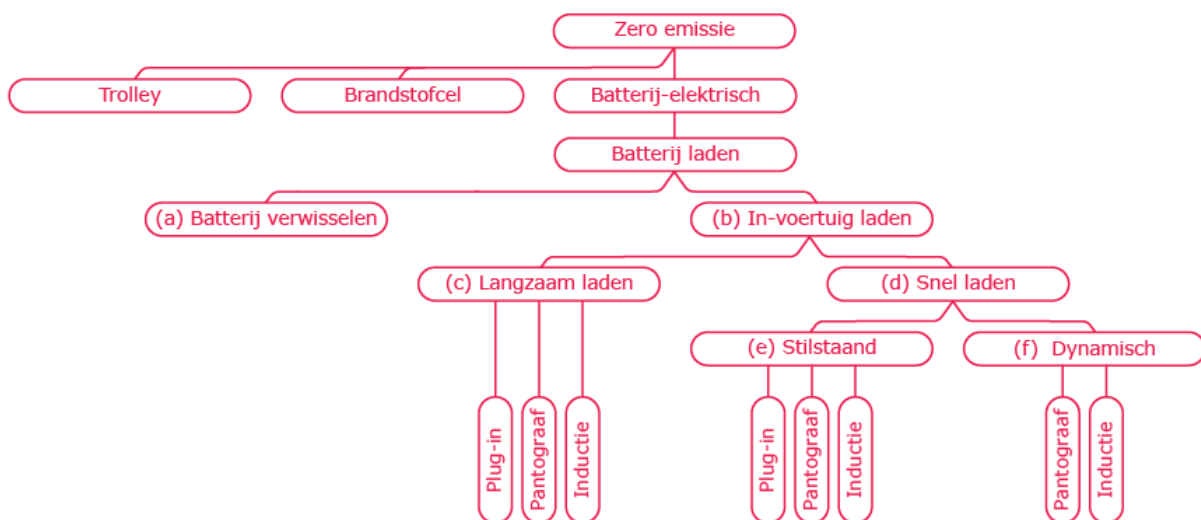
Drie jaar geleden, in 2015, waren er ongeveer 173.000 elektrische bussen in exploitatie. Het overgrote deel daarvan, 98,3%, reed in China rond. Deze scheve verdeling zorgt er voor dat China duidelijk koploper is op het gebied van de exploitatie van elektrische bussen (UITP, 2016). Het resterende deel van de elektrische busexploitatie vindt de facto

in Europa plaats. De vervoerbedrijven van meer dan 90 verschillende Europese steden exploiteren in ieder geval één elektrische bus. Deze steden zijn in verschillende studies door UITP (Union Internationale des Transports Publics) geanalyseerd (UITP, 2016) (UITP, 2017). De resultaten van deze analyses zijn terug te vinden in verschillende rapportages die onder het label ZeEUS (Zero Emission Urban bus System) zijn gepubliceerd. De facto de gehele Europese standaard van Europese bus- en laadsystemen wordt hierin gepubliceerd. Uit deze rapportages blijkt dat de Nederlandse openbaar vervoersector zeer progressief is aangaande inzet van elektrische bussen. In 2016 was 1% (61 voertuigen) van de Nederlandse busvloot elektrisch, terwijl een jaar later dit aantal met vijf procentpunt was toegenomen tot 6% (280 voertuigen) (CROW-KPVV, 2017). Wereldwijd neemt alleen in China het aantal elektrische bussen sneller toe.

Elektrische bussen zijn grofweg onder te verdelen in drie categorieën, namelijk:

1. Trolleybussen
2. Brandstofcel-bussen (waterstof)
3. Batterij-elektrische bussen

De laadsystemen voor de batterijen worden meestal op maat gemaakt en aangepast naar wensen van vervoerders (UITP, 2017). De klantwensen hangen meestal af van de capaciteit van de batterij en verschillen in lijnkaracteristieken. Ook lokale omstandigheden spelen een rol bij de keuze van laadsysteem, daarbij kan gedacht worden aan het aandeel van de kosten van exploitatie dat aan mankracht wordt gependend, maar ook aan het klimaat. De verschillende laadsystemen zijn in Figuur 1 uiteengezet.



Figuur 1: onderscheid naar zero emissie-mogelijkheden en de laadsystemen van batterij-elektrische bussen.

Bovenaan in Figuur 1 wordt verondersteld dat er een batterij opgeladen moet worden om exploitatie te continueren. Dat kan gebeuren middels het wisselen van de batterij (a), waarbij de lege batterij door een volle wordt vervangen. Daardoor is de laadtijd van de batterij in relatie tot openbaar vervoerexploitatie vrijwel niet relevant. Uiteraard kan de batterij ook geladen worden terwijl deze in het voertuig blijft (b). Het laden van in-voertuig batterijen kan op een langzame (c) en snelle (d) manier. De tijd dat het kost om een batterij te laden is veelal afhankelijk van het vermogen waarmee batterijen worden geladen. Langzaam laden gebeurt meestal 's nachts in de stalling, terwijl snelladen ook gebeurt op busstations. Het vol laden van batterijen kost met name veel tijd wanneer de batterij vol begint te raken. Binnen het snelladen wordt nog onderscheid gemaakt tussen statisch 'de bus staat stil' (e) en dynamisch 'de bus rijdt' (f) laden. Dynamisch laden staat vanwege de technische mogelijkheden (en daarmee de kosten) nog in de kinderschoenen (Lukic en Pantic, 2013). Wellicht dat toekomstige ontwikkelingen

dynamisch laden echter wel interessant maken. Meer detail over de laadsystemen is te vinden in Wiercx (2018).

2.2 Uitdagingen voor planning en exploitatie

De ingebruikname van batterij-elektrische bussen leidt tot nieuwe plannings- en exploitatievraagstukken: de capaciteit van een batterijlading is veelal onvoldoende om exploitatie van aanvang dienst tot einde dienst mogelijk te maken. Deze vraagstukken spelen niet bij de exploitatie van busvervoer met conventionele dieselbussen. Batterij-elektrische bussen hebben daarom 'onderweg' tijd nodig om hun batterij bij te laden. De laadtijd is afhankelijk van een aantal factoren, waarbij qua infrastructuur de laadmethodiek en beschikbare laadcapaciteit (aantal laadplaatsen) een belangrijke rol speelt. De meeste laadmethodes hebben als consequentie dat een andere planningsopzet onontbeerlijk is. De vraag is dus niet óf de planning aangepast moet worden, maar in welke mate?

De energievraag van elektrische bussen (en daarmee de behoefte om de batterij te laden) hangt af van verschillende factoren, zoals het aantal passagiers, de weersomstandigheden en verkeersomstandigheden (Topon en Hisashi, 2014; Rogge et al., 2015). Zowel verwarmen als koelen speelt een belangrijke rol bij de energieconsumptie. Suh et al (2014) testte een HVAC-unit (Heating, Ventilation, Air Conditioning: verwarmen, ventilatie, koelen) in een elektrische bus en concludeerde dat verwarmen of koelen in een elektrische bus 21,4% respectievelijk 18,8% meer energie kost. Dergelijke verschillen ten opzichte van een 'standaardscenario' hebben uiteraard grote effecten op de uiteindelijk te maken planning.

Behalve de laadfrequentie en de laadtijden, spelen hogere kosten voor zowel de voertuigen en de laadinfrastructuur ook een majeure rol bij grootschalige ingebruikname van elektrische bussen (Topon en Hisashi, 2014). Een elektrische bus kan tot twee keer zo duur zijn als een vergelijkbare dieselbus, waarbij een groot deel van de kosten voor rekening komen van de batterijen (Wiesinger, 2014). Ruim een kwart (26%) van het gewicht van elektrische bussen bestaat uit batterijen, terwijl 39% van de kosten voor rekening van de batterijen komt (Bi et al., 2015).

Van Kooten Niekerk et al. (2017) stellen dat zowel locatie als laadcapaciteit de kosten van laadplaatsen opdrijven. Onder andere grondprijzen en de beschikbaarheid van elektriciteitsinfrastructuur met een hoog vermogen speelt een rol. Daarnaast dient de elektriciteitsinfrastructuur ook voldoende (extra) capaciteit te hebben om bussen aan te laden. Beide aspecten hebben ook zo hun invloed op de exploitatie van het busnetwerk: zowel de beschikbare ruimte als beschikbare vermogen hebben hun weerslag op het aantal voertuigen dat simultaan batterijen kan laden.

Kortom, er dient een balans gevonden te worden tussen exploitatiekosten, kosten en baten voor reizigers en kosten die gepaard gaan met het gebruik van laadinfrastructuur. De vraag is niet alleen aan welke knoppen gedraaid kan of moet worden om een zo'n efficiënt mogelijk systeem op te zetten, maar ook hoeveel er aan deze knoppen gedraaid moet worden. Daarnaast speelt ook de laadstrategie een belangrijke rol bij het bepalen van de efficiency: moeten voertuigen altijd laden? Of alleen indien noodzakelijk? En hoeveel dan, helemaal vol of alleen het noodzakelijke?

2.3 Onderzoeksvraag en -scope

Om de vragen uit 2.2 te beantwoorden en inzichten te bieden in de keuzes en de consequenties van laadmethodes in verschillende situaties is een vergelijkingsraamwerk opgesteld om verschillende laadmethodes voor elektrische bussen te vergelijken. Door verschillende methodes te vergelijken worden eerste inzichten in de laadmethodes en laadstrategieën vergeleken. De uitvoer wordt vergeleken aangaande efficiency met

betrekking tot exploitatie en laadinfrastructuur, terwijl ook robuustheid van het systeem getoetst wordt. De volgende onderzoeksvraag is opgesteld om een antwoord te vinden op bovenstaande vragen en, bovenal, inzicht te creëren in de effecten van verschillende laadsystemen en -technieken:

Wat is het effect van verschillende laadinfrastructuurkeuzes op busstations op de exploitatie, serviceniveau en de kosten, en hoe kunnen laadscenario's zodanig ingezet worden dat zij zo efficiënt mogelijk zijn?

Het onderzoek focust op busstations, aangezien daar verschillende lijnen langskomen en laadinfrastructuur efficiënt ingezet kan worden. Passend bij het strategische karakter van het model, worden buslijnen in het model geladen middels verschillende invoerparameters. Detailinformatie, zoals optrekken, afremmen, het aantal kruisingen, het aantal bochten en bezettingsgraden zijn wellicht in later stadium interessant om mee te nemen.

Daarnaast worden alleen 100% batterij-elektrische bussen in beschouwing genomen. Andere alternatieve brandstoffen (zoals de hiervoor beschreven verschillende gassoorten) stoten nog steeds kleine hoeveelheden broeikasgassen uit en zijn daarmee niet zero-emissie. Vanuit kosten oogpunt zijn waterstof- en trolleybussen niet meegenomen in dit onderzoek. Wanneer waterstof- en trolleybussen een betaalbaar(der) alternatief worden, kan het model uitgebreid worden met deze alternatieven.

Aangezien het model gebruikt wordt om verschillen in laadsystemen en -mechanismes (zie 2.2.) te onderzoeken, worden criteria gebruikt die verschillen in laadsystemen en -mechanismes aanduiden. Verschillen die puur tussen diesel- en elektrische bussen aanwezig zijn, zijn dus niet in het model opgenomen.

3. Methodologie: het *VOLTAGE*-model

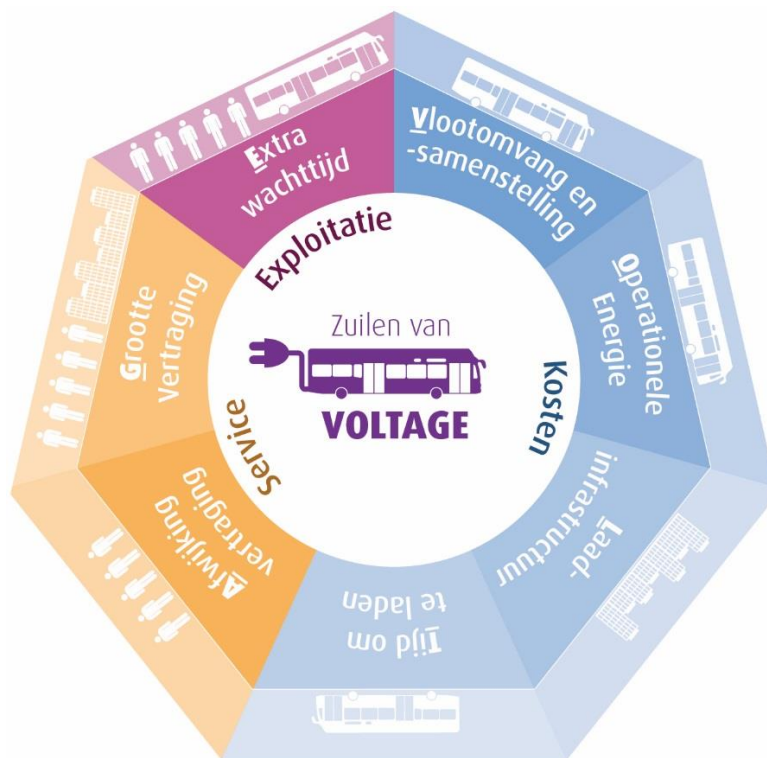
3.1 Zuilen van VOLTAGE

Om de effecten van verschillende laadmethoden en -mechanismes op exploitatie, serviceniveau en kosten te kwantificeren is een kwantitatief onderzoek opgesteld. Voor het onderzoek is een model opgesteld dat de exploitatie op een busstation beschouwd bij verschillende laadmethoden en -mechanismes. Om verschillende varianten op eenzelfde manier te vergelijken is een raamwerk opgesteld (zie Figuur 2 en Tabel 1). Het raamwerk beschouwt (maatschappelijke) kosten en baten voor de drie belangrijkste partijen binnen het openbaar busvervoer, namelijk: passagiers, vervoerbedrijven en openbaar vervoerautoriteiten.

Er zijn vier kostenelementen opgenomen in *VOLTAGE*. Allereerst speelt de toename in exploitatiekosten een rol door de vertraging te vertalen naar extra DRU-kosten. Als tweede element spelen de energiekosten een rol, waarbij met name de verschillen tussen verschillende laadscenario's inzichtelijk worden gemaakt, maar eveneens het verschil tussen dieselmotoren en elektrische bussen duidelijk naar voren komt. Het voorlaatste element heeft effect op de netto contante waarde van de investeringen in de vloot benodigde voertuigen. Als vierde element worden de investeringskosten van de laadinfrastructuur meegenomen. Ook deze worden in netto contante waarde uitgedrukt.

Het serviceniveau wordt door twee elementen beschreven, namelijk de (gemiddelde) vertraging bij het vertrekken en afwijking (spreiding) van de vertraging. Vertraging wordt hier beschouwd als die ontstaat door het laden van de batterij en is dus 'extra' ten opzichte van exploitatie met dieselmotoren. Voorts worden ook 'afwijkingen van de vertragingen' beschouwd om betrouwbaarheid mee te indiceren. Beide elementen worden gerelateerd aan het aantal reizigers om zodoende meer 'gewicht' te geven aan drukke buslijnen.

Tot slot worden de verschillende effecten op exploitatie vergeleken door het percentage verstoorde voertuigen te beschouwen. Een voertuig wordt als verstoord beschouwd wanneer het voertuig moet wachten om passagiers te laten in- of uitstappen of wanneer het moet wachten om de batterij op te laden.



Figuur 2: Zuilen van VOLTAGE.

Tabel 1: Zuilen van VOLTAGE nader verklaard.

criterium	Variabele	Verklaring	Belangrijkste stakeholder(s)
Kosten	1 V lootomvang en -samenstelling	Netto contante waarde van de elektrische en niet-elektrische vloot, in €.	Vervoerder
	2 O perationale energie	Dagelijkse energiekosten om OV te exploiteren, in €.	Vervoerder
	3 L aadinfrastructuur	Netto contact waarde van de laadinfrastructuur, in €.	OV-autoriteit, vervoerder
	4 T ijd om te laden	Dagelijkse kosten vanwege laadtijd, in €.	Vervoerder
Service	5 A fwijking vertraging	Dagelijkse kosten die met onbetrouwbaarheid gepaard gaan, in €.	Passagiers en OV-autoriteit
	6 G rootte vertraging	Dagelijkse kosten in relatie tot vertraagde vertrekken (vanuit het perspectief van passagiers), in €.	Passagiers en OV-autoriteit
Exploitatie	7 E xtra wachttijd vertraging	Percentage voertuigen dat moet wachten om bij in-/uitstaphalte of laadplaats te komen, per dag.	Vervoerder en passagiers

3.2 Invoer van VOLTAGE

Om *VOLTAGE* te laden met de juiste parameters en variabelen is eerst een literatuuronderzoek gedaan, waarvan de hoofdconclusies eerder in dit paper zijn opgenomen. Wiercx (2018) beschouwt de literatuur op meer detailniveau. *VOLTAGE* is ontwikkeld aan de hand van een casus om het model te verfijnen en het model te valideren. Daarnaast is de casus gebruikt om andere variabelen te definiëren om eventueel in het vervolg in het model te implementeren. *VOLTAGE* is dus iteratief ontwikkeld. Het model maakt gebruik van bestaande softwarepakketten, zoals MS Excel en SimBus (Wiercx, 2018). Het conceptueel model is te zien in Figuur 3.

Alhoewel *VOLTAGE* (de exploitatie op een) busstation beschouwd, hebben effecten buiten het busstation wel degelijk effect op de activiteiten op het busstation. Voor zover passend bij het strategische karakter van het model, worden ook variabelen die effect hebben op de (mogelijke) laadtijd worden daarom in het model opgenomen. Variabelen zoals het aantal kruispunten, het aantal keren optrekken en afremmen wordt niet meegenomen. Het gaat er dan bijvoorbeeld om wat het voertuig doet tussen garage en het busstation en wat het voertuig volgens planning gaat doen voordat het weer aankomt bij een laadstation. Voor Nederlandse situaties wordt hierbij geput uit NDOV-data (Van Oort et al., 2015).

Eveneens is een database in het model opgenomen met karakteristieken van elektrische bussen die in 2017 op de Europese markt verkrijgbaar zijn (UITP, 2016; UITP, 2017). Karakteristieken zijn onder andere energieverbruik en batterijcapaciteit.

Zoals in hoofdstuk 2 gesteld, spelen algemene variabelen die effect hebben op alle lijnen en op alle voertuigen ook een rol. Gedacht wordt daarbij aan seizoensfactoren (in verband met koelen en verwarmen), een algemeen te hanteren batterijbuffer en een maximum tot waar de batterij geladen dient te worden. Dat laatste speelt een rol bij het snelladen van de batterij en zorgt ervoor dat de batterij niet oververhit raakt en daardoor onbruikbaar wordt (Van Kooten Niekerk et al., 2017).

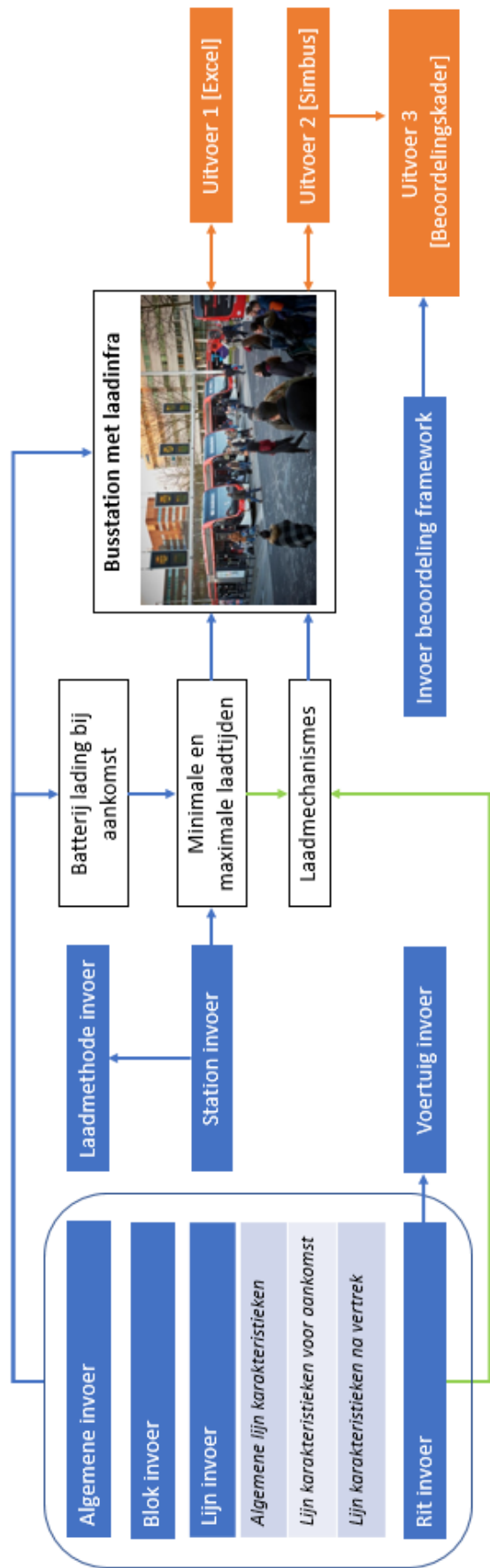
Bovenstaande invoer wordt gebruikt om drie modules mee 'aan te sturen', deze worden hierna beschreven.

3.3 Laadtijdmodule van VOLTAGE

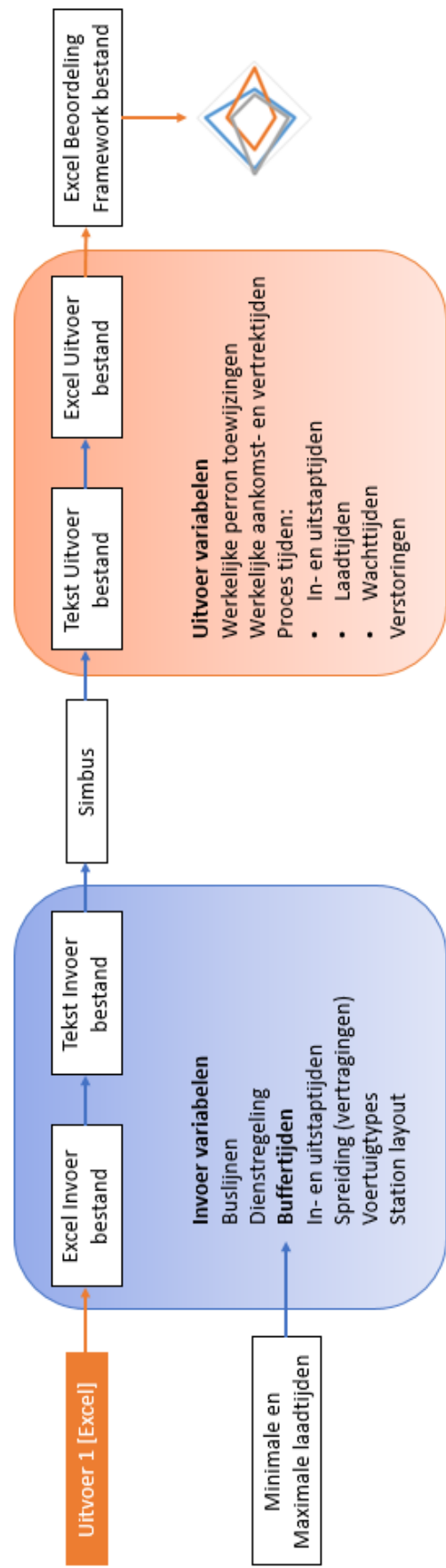
Allereerst wordt de minimum en maximum laadtijd berekend. Dit wordt gedaan aan de hand van de voertuigdata en andere data, zoals in Figuur 2 is te zien. De resterende batterijcapaciteit wordt elke keer berekend wanneer een voertuig op het te onderzoeken busstation aankomt. Dit wordt gedaan aan de hand van de 'voertuiggeschiedenis'. Aan de hand van de planning wordt vervolgens berekend hoeveel batterijcapaciteit noodzakelijk is om te zorgen dat het voertuig terugkeert op het busstation, in de garage of op een ander laadpunt. Vervolgens wordt bepaald hoeveel de batterij eventueel minimaal moet en maximaal kan laden. Afhankelijk van de te hanteren strategie wordt het minimum (benodigd voor exploitatie) of het maximum (batterijcapaciteit) geladen.

3.4 Exploitatiemodule van VOLTAGE

In de tweede module wordt in SimBus het busstation gesimuleerd. SimBus is een door Goudappel Coffeng (Wiercx, 2018) ontwikkeld model en bepaalt de optimale allocatie van voertuigen in relatie tot beschikbare haltes om passagiers in of uit te laten stappen. Daarnaast worden buffer- en laadplaatsen in beschouwing genomen. De invoer voor de exploitatiemodule wordt gebaseerd op voertuigvolgdata om zodoende vertragingen in aankomst op het busstation realistisch mee te nemen. Uiteindelijk geeft SimBus uitvoer aangaande de mate van verstoring, het gebruik van halte-, buffer- en laadplaatsen (Figuur 4).



Figuur 3: Conceptueel model



Figuur 4: data-flow van VOLTAGE.

3.5 Kosten/baten-module

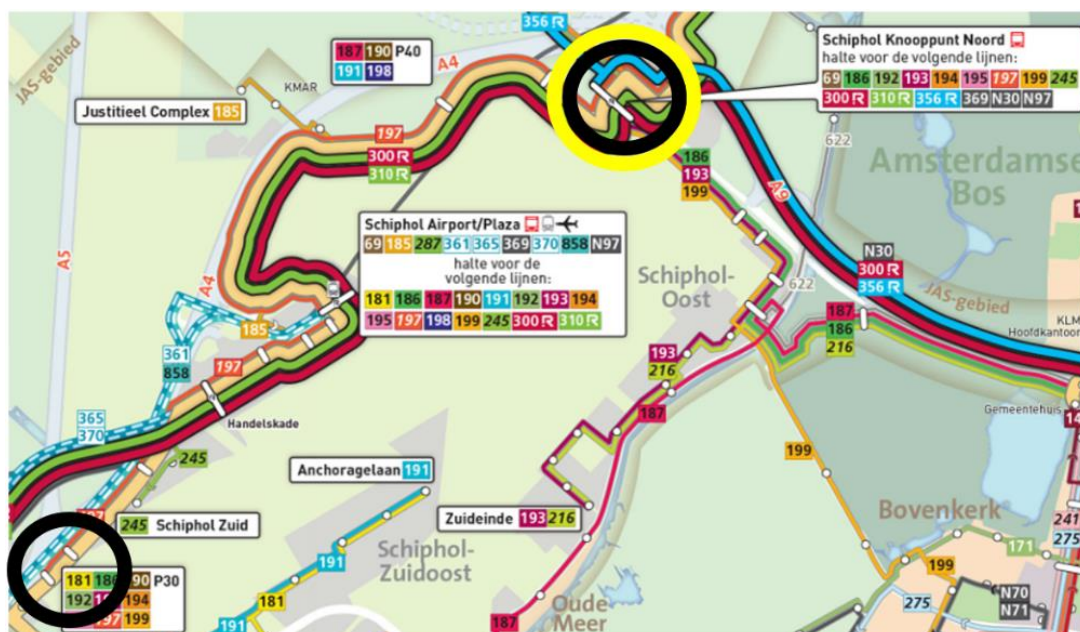
De derde en laatste module 'vertaalt' de uitvoer van SimBus naar kosten en baten vanuit het vergelijkingsraamwerk. Sommige variabelen komen direct uit de invoer (uit Figuur 2), anderen komen uit één van de modules. Het betreft dan bijvoorbeeld de kosten voor de vloot aan de hand van het benodigd aantal bussen. Uit SimBus komt onder andere de vertraging die wordt gemeten als percentage van het totaal aantal ritten en – om het effect te meten voor passagiers – vermenigvuldigd met het aantal passagiers.

Bovenstaand conceptmodel is toegepast op de casus Schiphol. In het volgende hoofdstuk wordt de casus – en daarmee *VOLTAGE* – toegelicht.

4. Casus Schiphol

De casus Schiphol is gebruikt om op iteratieve wijze *VOLTAGE* fijn te slijpen en om resultaten van het model te tonen. Schiphol wordt bediend door hoogwaardig openbaar vervoerlijnen die, net zoals elders in de Randstad, als R-net in de markt worden gezet. R-net bedient met name de grote(re) plaatsen in en rond het zuiden en zuidoosten van Amsterdam. Behalve de hoogfrequente R-netlijnen wordt Schiphol eveneens bediend door hoogfrequente Schiphol Sternetlijnen. Deze lijnen verbinden de op Schiphol Plaza gelegen terminal met name met parkeervoorzieningen die verder weg zijn gelegen. Beide hoogfrequente systemen leiden tot veel voertuigbewegingen op en rond Schiphol. Behalve R-net en Schiphol Sternet wordt Schiphol ook nog verbonden met een aantal omliggende kernen middels diverse stads- en streeklijnen.

Als onderdeel van de concessie Amstelland-Meerlanden zijn in 2017 elektrische bussen ingestroomd. Connexxion maakt (uiteindelijk) gebruik van meer dan honderd elektrische bussen en exploiteert daarmee Europa's grootste elektrische vloot. Om deze elektrische vloot te laden, zijn er twee snel-laadlocaties in gebruik (zie Figuur 4). Behalve de snellader bij busstations zijn er enkele laders in gebruik bij twee stallingen. Om de elektrische bussen te exploiteren heeft Connexxion een nieuwe planning gemaakt die om kan gaan met het laden van de batterijen van de bussen (Kraaijvanger, 2018).¹



Figuur 4: buslijnennet op en rond Schiphol (situatie najaar 2017).

¹ Ten tijde van het onderzoek waren er slechts implementatieplannen van de concessie Amstelland-Meerlanden bekend.

4.1 Varianten en scenario's

Voor de casus Schiphol zijn drie laadmethoden onderzocht, namelijk:

1. Langzaam laden bij de stalling;
2. Snelladen met een pantograaf;
3. Snelladen met inductie.

Laden bij de stalling heeft als voordeel dat er geen extra laadvoorzieningen bij busstations aanwezig hoeven te zijn. Het nadeel is echter dat de bus een bepaalde tijd niet gebruikt kan worden voor exploitatie en er op dat moment een ander, extra, voertuig aanwezig moet zijn om de exploitatie over te nemen.

Behalve deze laadmethoden zijn er verschillende vlootconfiguraties meegenomen in het onderzoek, namelijk:

1. Geen elektrificatie, ten behoeve van het doorrekenen van de referentie;
2. Alleen elektrische stads- en Snetnetbussen;
3. Alleen elektrische R-netbussen (Hoogwaardig Openbaar Vervoer, HOV); en
4. Volledige elektrificatie.

Ten derde zijn er diverse laadmechanismes onderzocht. Op deze wijze wordt niet alleen onderzocht wat de bandbreedte van de laadtijden zijn door minima en maxima door te rekenen, maar genereert het model ook inzichten voor het plannen van elektrische bussen wanneer een 'tussenoplossing' voldoet. Nadat het zoekgebied is afgebakend worden de resultaten dus verfijnd. In Tabel 2 zijn de laadmechanismes opgenomen.

Tabel 2: Laadmechanismes

Laad-mechanisme	Laadtijd	Laadprincipe	Noodzaak
Min	Minimum	Minimaal laden, als laden noodzakelijk is	Bepaalt het zoekgebied van de laadtijden
Max	Maximum	Altijd laden tot het maximum	
Spits	Afhankelijk van tijd van de dag	Minimaal laden gedurende spits, maximaal laden gedurende dalperiodes	Legt minder druk op piekperiodes
Plaats	Afhankelijk van het aantal plaatsen	Maximaal laden wanneer mogelijk, minimaal laden wanneer er een tekort aan laadplaatsen ontstaat	Limiteert de wachttijd voor het laden
Noodzakelijk	Afhankelijk van noodzaak	Maximaal laden, wanneer laden noodzakelijk is	Limiteert het aantal momenten om te laden

Het is mogelijk om vanuit bovenstaande elementen veertig (2 laadmethoden x (4-1) vlootconfiguraties x 5 laadmechanismes = 30) combinaties te maken. Voor dieselbussen worden geen laadmechanismes meegerekend, vandaar dat de vlootconfiguratie 'diesel' verder geen effect heeft op het aantal te maken combinaties. Voor de laadmethode 'langzaam laden bij de stalling' is echter gekozen om alleen het minimum aantal extra voertuigen te onderzoeken. Laden bij de stalling kost al extra voertuigen, dus de extra's worden op deze wijze zo veel mogelijk geminimaliseerd.

4.2 Invoer variabelen

Het model is opgesteld om één snellaadstation in het netwerk te onderzoeken. Op die manier worden de variabelen die invloed hebben op het batterijgebruik in detail gesimuleerd. Rond Schiphol is gekozen voor Schiphol Knooppunt Noord (Figuur 4). Een theoretisch aantal van acht snelladers is geprojecteerd op Schiphol Knooppunt Noord. Er

wordt verondersteld dat een net zo groot aantal halteplaatsen beschikbaar is om passagiers in en uit te laten stappen.

Ten tijde van het onderzoek waren er nog geen gegevens beschikbaar van de elektrische bussen die momenteel op en rond Schiphol hun rondjes rijden. De VDL Citea SLFA Electric is bovendien nog niet opgenomen in de gebruikte voertuigdatabase. De Solaris Urbino electric PA heeft echter vergelijkbare specificaties. *VOLTAGE* is voor deze casus om die reden met de Solaris Urbino doorgerekend. Deze bus van 18 meter lengte kan 129 passagiers tegelijkertijd vervoeren. Om die passagiers te vervoeren verbruikt de Solaris Urbino gemiddeld 1,3 kWh per kilometer. De batterij heeft een opslagcapaciteit 240 kWh.

De simulatie is gebaseerd op een doordeweekse herfstdag en daardoor wordt verwacht dat de seizoensfactor neutraal is; er wordt gerekend met een seizoensfactor van 1. De batterij wordt zo goed mogelijk gebruikt en daarom mogen snelladers de batterij maximaal opladen tot 80% van de capaciteit. Om de effecten van diverse varianten door te rekenen, is gebruik gemaakt van passagierstellingen te Schiphol, zodat er invoer aanwezig is om verschillende vertragingen te wegen.

4.3 Resultaten

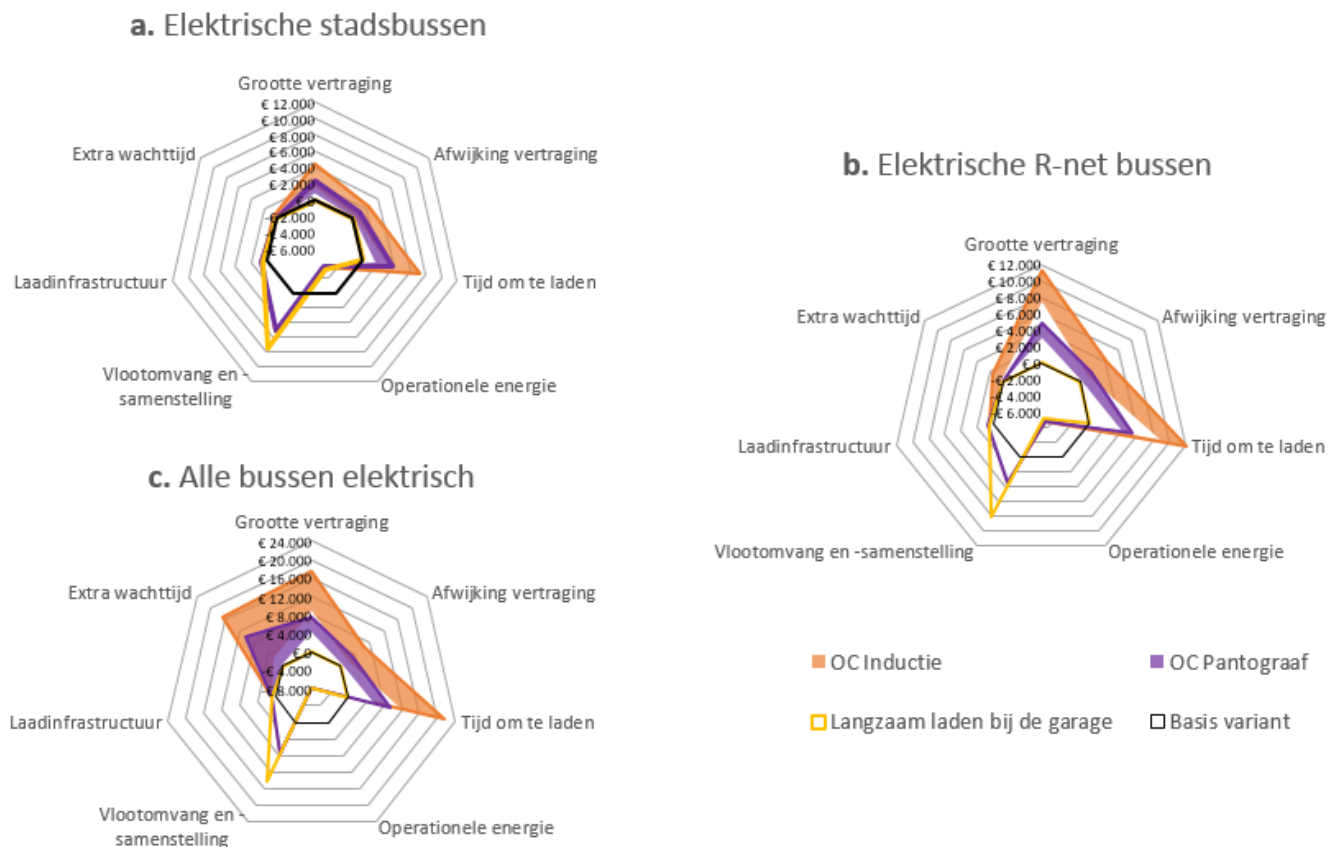
De resultaten van het doorrekenen van Schiphol Knooppunt Noord zijn weergegeven in Figuur 5. De referentiesituatie (met dieselbussen) is gebruikt als ijkpunt. Verschillende vlootvarianten, zoals elektrische stadsbussen, elektrische R-netvoertuigen en een gehele elektrische vloot zijn weergegeven in Figuur 5a tot en met 5c. De drie verschillende laadmethoden zijn middels kleuren weergegeven. Het vlak geeft daarbij de bandbreedte van de verschillende laadmechanismes weer. Aangezien langzaam laden bij de stalling slechts één laadmechanisme kent, is het vlak hier 'automatisch' in een lijn veranderd. Van elk vergelijkingscriterium (Tabel 2) is zowel de minimum- als de maximumwaarde weergegeven.

Bij het langzaam laden bij de stalling is het belangrijk een optimum te vinden tussen enerzijds de hoge voertuuginvesteringskosten en anderzijds de energiebesparingen. In vergelijking met de referentie, resulteert langzaam laden bij de stalling niet in extra vertragingen. Achterliggende oorzaak is dat het aantal voertuigen in deze variant dermate hoog is dat het extra aantal voertuigen mogelijke vertragingen 'de kop in drukt'.

Snelladen bij het busstation levert wel extra vertragingen op. Zowel de vertragingen zelf als de afwijking van de vertragingen scoren substantieel hoger dan in de referentiesituatie. Het verschil tussen laden met inductie en pantograaf wordt verklaard door de lagere vermogens die het laden met inductie met zich meebrengt.

Qua vlootconfiguratie valt op dat elektrificatie van de vloot van R-netlijnen leidt tot veel lagere investeringskosten dan bij elektrificatie van stads- en regionale voertuigen. Voor de R-netlijnen zijn 56 voertuigen nodig, terwijl de andere lijnen gezamenlijk 78 voertuigen nodig hebben. Bij elektrificatie van R-netlijnen zijn de kosten die gepaard gaan met vertragingen echter veel groter. Dat komt met name door meer en langere laadactiviteiten die noodzakelijk zijn op de hoogfrequente en relatief lange lijnen van R-net. De keuze tussen elektrificatie van R-netlijnen enerzijds óf overige lijnen anderzijds is daardoor een moeilijk af te wegen keuze.

Uiteraard resulteert volledige elektrificatie van de vloot in de hoogste investeringskosten, de hoogste vertragingen, maar wel de laagste energiekosten. De hoge percentages Extra wachttijd en daaruit vloeiende hoge vertragingen tonen duidelijk aan dat acht laadpunten te Schiphol Knooppunt Noord te weinig is: bussen moeten wachten om te laden.



Figuur 5: scores ten opzichte van de referentiesituatie voor (a) een geëlektrificeerde stadsdienst, (b) elektrische R-netdienst, en (c) een volledige elektrische vloot. Let op, het aantal verstoringen is weergegeven in percentages en de schaal van Figuur 5c wijkt af van de schaal van Figuur 5a en Figuur 5b.

5. Conclusies, discussie en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In het algemeen geldt dat de totale kosten toenemen wanneer exploitatie van elektrische voertuigen wordt vergeleken van exploitatie van dieselveertuigen. Het hoofddoel van zero emissie-exploitatie is dan ook niet te streven naar kostenreductie, maar de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Vervoerders dienen meer investeringen te doen om een elektrische vloot aan te schaffen, aangezien een elektrische vloot 60% tot 80% duurder is dan dieselvloot. Daarnaast is er ook laadinfrastructuur benodigd die bij dieselvloot ontbreekt. Anderzijds zijn de energiekosten bij elektrische bussen veel lager, waardoor met name lange(re) (HOV-)lijnen profijt hebben van exploitatie met elektrische bussen.

Om elektrische bussen te laden, zijn verschillende laadmethodes onderzocht. Het langzaam laden bij de stalling heeft als nadeel dat het laden overdag veel tijd kost. Extra voertuigen zijn dan nodig om de exploitatie voort te kunnen zetten. Deze extra kosten leiden tot forse investeringen. Naast het langzaam laden kan er ook snel geladen worden. Het voordeel van snelladen is dat het gecombineerd kan worden met andere activiteiten op het busstation en zodoende stilstand tijd efficiënt(er) gebruikt kan worden, aangezien deze gebruikt kan worden om de batterij te laden. Hierbij dient stilstand tijd als een surplus beschouwd te worden en niet als het minimum aan keertijd, dat sowieso nodig is om vertragingen te minimaliseren. Indien het laadsysteem overvraagd wordt,

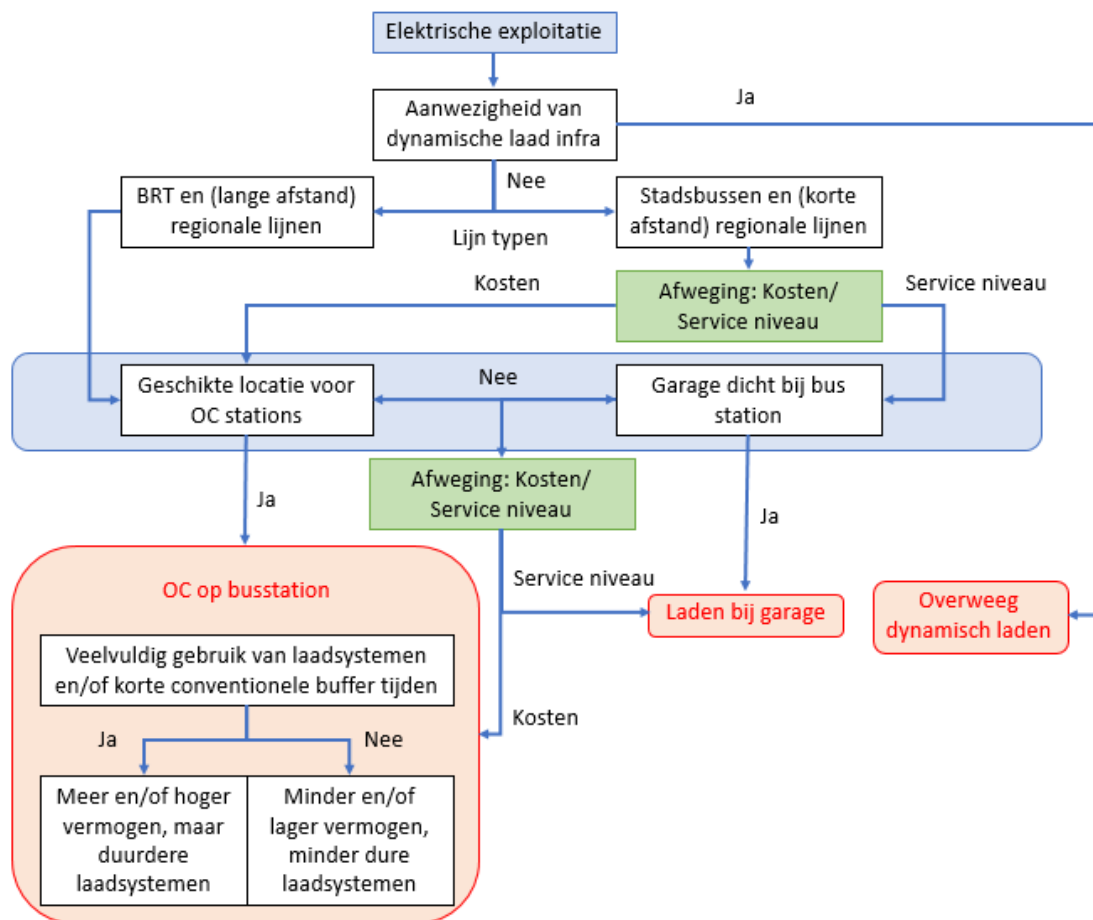
omdat frequenties omhoog gaan of lijnen langer worden, dan ontstaan vertragingen en heeft het overvragen een direct negatief effect op de kosten die daarmee gemoeid zijn.

Dynamisch laden combineert het laden en exploitatie. Bij dynamisch laden is echter wel dusdanig veel laadinfrastructuur nodig dat deze techniek nog in de kinderschoenen staat. Wellicht dat toekomstige technische ontwikkelingen deze techniek gemakkelijker implementeerbaar maakt. Anderzijds kunnen technische ontwikkelingen ook tot toename van de batterijcapaciteit leiden, waardoor dynamisch laden geheel buiten beschouwing blijft.

5.2 Discussie

Dit onderzoek is bruikbaar voor beleidsmakers en planners van vervoerbedrijven. Om het serviceniveau te behouden en investeringskosten te minimaliseren, moeten diverse keuzes gemaakt worden door vervoerders en openbaar vervoerautoriteiten. Figuur 6 representeert een (mogelijke) beslisboom die vervoerders 'door moeten' wanneer zij exploitatie elektrisch willen uitvoeren of uitbreiden.

Tot op heden geldt dat dynamisch laden alleen realistisch is als de infrastructuur reeds (gedeeltelijk) aanwezig is. Behalve investeringskosten voor deze locatie dient ook een balans gevonden te worden in de effecten op het serviceniveau en de investeringskosten. De laadlocatie ligt daarom veelal bij het busstation, de stalling of een combinatie van beiden. Voor lange, hoogfrequente lijnen geldt dat laden bij het busstation de voorkeur geniet, omdat anders de investeringen in de vloot bijzonder groot worden. Door op busstations verschillende lijnen gebruik te laten maken van de laadinfrastructuur kan gekozen worden om duurdere maar wel snellere laadsystemen in gebruik te nemen.



Figuur 6: Beslisboom voor vervoerders om laadmethoden te kiezen

Tot slot geldt dat een model altijd een versimpelijking van de werkelijkheid is met verschillende invoer gebaseerd op onderbouwde aannames. Eén van die aannames is bijvoorbeeld dat bussen bij aanvang van exploitatie de stalling met een volle batterij verlaten. In een wereld die steeds vaker 'rond de klok' functioneert en waar steeds meer nachtbussen rijden leidt deze aanname wellicht tot het onderschatten van de minimale laadtijd. Locatie-specifieke kosten, zoals de kosten die gepaard gaan met het aanleggen van een adequaat elektra-netwerk zijn momenteel onvoldoende aanwezig. Een verder verfijning van *VOLTAGE* biedt wellicht mogelijkheden om deze componenten toe te voegen aan het model.

5.3 Aanbevelingen

De investeringskosten van de vloot nemen substantieel toe bij de keuze voor elektrische bussen. Om ook vervoerders met minder financiële middelen hun positie in de markt te laten behouden, wordt – ten behoeve van het gelijke speelveld – voorgesteld aan openbaar vervoerautoriteiten te helpen met de financiering van de elektrische vloot.

Om *VOLTAGE* ten volle tot zijn recht te laten komen, wordt aanbevolen *VOLTAGE* te gebruiken bij het plannen van een geheel elektrisch busnetwerk. Tot op heden functioneren diverse pilots op lijnniveau. Het blijkt echter dat het opschalen van een kleine naar een grote(re) vloot non-lineaire consequenties heeft op verschillende uitkomsten.

VOLTAGE is gevuld met informatie en aannames die begin 2018 bekend zijn. Aangezien de ontwikkelingen binnen de 'elektrische buswereld' snel gaan, is het raadzaam de invoer van *VOLTAGE* regelmatig te updaten en te voorzien van nieuwe waardes. Naar verwachting wordt de batterijcapaciteit steeds groter en de batterijen steeds goedkoper. Daarnaast ontwikkelt naar verwachting ook de batterijtechnologie, waardoor aan te houden buffers naar beneden en maximale batterijcapaciteit bij snelladen omhoog bijgesteld kunnen worden. Deze ontwikkelingen resulteren allen in andere laadmechanismes, andere keuzes en daarmee een andere planning van de inzet van elektrische bussen.

Elektrische bussen worden geëxploiteerd ten einde het openbaar busvervoer zero emissie uit te voeren. De ontwikkelingen op het gebied van waterstof en hybride bussen staan ook niet stil. Dat geldt eveneens voor het laden van batterijen middels dynamisch laden. Om ook in de toekomst een afgewogen keuze te maken is het raadzaam *VOLTAGE* te verrijken met modules die om kunnen gaan met deze technieken.

6. Dankwoord

Het onderzoek dat voorafgegaan is aan het schrijven van dit paper is mede mogelijk gemaakt door Goudappel Coffeng en het TU Delft Smart Public Transport Lab. Daarnaast willen de auteurs vervoerbedrijf Connexxion en de Vervoerregio Amsterdam danken voor het leveren van de gebruikte data.

7. Referenties

Bi, Z., L. Song, R. de Kleine, C.C. Mi, G. A. Keoleian, 2015. Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. *Applied Energy*, 2015(146), pp. 11-19.

CROW-KpVV, 2017. Nederland wordt koploper met elektrische bussen. [Online]. Beschikbaar via <http://www.crow.nl/kennis/bibliotheek-verkeer-en->

[vervoer/kennisdocumenten/nederland-wordt-koploper-met-elektrische-bussen?onderwerp=53;&page=1&searchsort=date&pagesize=10&parenturl=/Vakgebieden/Verkeer-en-Vervoer/Bibliotheek](https://www.kennisdocumenten.nl/vervoer/kennisdocumenten/nederland-wordt-koploper-met-elektrische-bussen?onderwerp=53;&page=1&searchsort=date&pagesize=10&parenturl=/Vakgebieden/Verkeer-en-Vervoer/Bibliotheek) [Bekeken op: 15 September 2017].

Kooten Niekerk, M. van, van den Akker, J. & Hoogeveen, J., 2017. Scheduling electric vehicles. *Public Transport*, 2017(9), pp. 155-176.

Kraaijvanger, B., 2018. Schiphol Airport: implementing the electric future. *Intelligent Transport*. [Online]. Beschikbaar via <https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/69144/schiphol-airport-electric-future/> [Accessed 15 January 2018].

Laizans, A., Graurs, I., Rubenis, A. & Utehin, G., 2016. Economic viability of electric public busses: regional perspective. *Procedia Engineering*, 2016(134), pp. 316-321.

Lukic, S. & Pantic, Z., 2013. Cutting the cord: static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, Volume 2013, pp. 2325-2332.

Oort, N. van, D. Sparing, T. Brands, R.M.P. Goverde, 2015. Data driven improvements in public transport: the Dutch example, *Public Transport*, Vol 7(3), pp.369-389.

Ou, X., Zhang, X. & Chang, S., 2010. Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. *Energy Policy*, 2010(38), pp. 406-418.

Rijksoverheid, 2016. [Online]. Beschikbaar via <https://www.government.nl/latest/news/2016/04/15/dutch-public-transport-switches-to-100-percent-emissions-free-buses> [Bekeken op: 6 September 2017].

Rogge, M., Wollny, S. & Uwe Sauer, D., 2015. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport: A feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. *Energies*, 2015(8), pp. 4587-4606.

Suh, I. et al., 2014. Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging. *Energy*, 2015(81), pp. 262-273.

Tzeng, G., Lin, C. & Opricovic, S., 2005. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy* 33, pp. 1373-1383.

Topon, P. & Hisashi, Y., 2014. *Operation and charging scheduling of electric buses in a city bus route network*. Qingdao, IEEE.

UITP, 2016. *ZeEUS eBus Report: An overview of electric buses in Europe*, s.l.: ZeEUS.

UITP, 2017. *ZeEUS eBus Report #2: An updated overview of electric buses in Europe*, s.l.: ZeEUS.

Wiercx, M., 2018. Operations of Zero-emission bus transport. MSc Thesis. TU Delft

Wiesinger, P., 2014. *Innovative electric buses in Vienna*, Vienna: Clean fleets.