

ENERGIEGEBRUIK ELEKTRISCHE 'VW CARAVELLE'

Verwerking en analyse van meetgegevens uit de praktijkproef

P.C. McKay
C.H. Volkers

Verantwoording

De studie is uitgevoerd in opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (Novem), en staat bij ECN geregistreerd onder projectnummer 7.7407. De werkzaamheden zijn tot stand gekomen met subsidie uit het programma Stiller, Schoner en Zuiniger verkeer en vervoer in stedelijk gebied (SSZ) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Abstract

The demonstration project with electric Volkswagen Caravelles started at the end of 1995 with 3 vehicles. During the project the number of vehicles grew to 12. The Volkswagen Caravelle is a small passenger bus with 7 seats. The objective of the project is to gain experience with electric vehicles in daily use. The aim of the various measurements which were carried out is to get an insight into the behaviour of the electric vehicles used. The prime area of the investigation is related to the energy use.

The first measurements on the road showed a much higher energy consumption compared to what was expected on the basis of rolling road measurements. During the demonstration project it quickly became obvious that the initially high energy consumption showed a gradual reduction in time. To drive efficiently with the electric VW Caravelle is clearly a process of familiarisation. To explain the differences in energy consumption of the different participants an extensive search for possible causes was carried out. It is remarkable that there seems to be no direct relationship between the average speed of a trip and the energy used. The length of a trip can have a significant impact on the energy use of a vehicle. Most vehicles followed the trend that the longer the trip the lower the energy use per kilometre driven. The possibility to recuperate braking energy is an important characteristic of electric vehicles. For an electric vehicle it presents a possibility to extend its range on one battery charge. Recuperation percentages of 5.9 to 15.9% were measured during the demonstration project.

During the period over which measurements of the energy consumption from the grid were taken, the actual primary energy use of the electric VW Caravelle was higher than for a conventional diesel version. The most important reason for this finding is the fact that the total losses in the charging process of the traction batteries are so high (55%). Even if a period is taken in which the electric VW Caravelle was at its most frugal, the primary energy use was still slightly above that of the diesel version. The charging process of the traction battery as specified by the battery manufacturer is mainly responsible for the substantial losses. Further investigation will be necessary to reduce the losses in the charging process of the battery. Fast charging is already a possibility to reduce the charging losses.

INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	9
2. HET MEETPROGRAMMA	11
2.1 De vorige praktijkproef	11
2.2 Beschrijving van het data-acquisitiesysteem	11
2.3 De verzamelde data	13
3. DATA-ACQUISITIE	15
3.1 Problemen met de data-acquisitie	15
3.1.1 Problemen die de betrouwbaarheid en inzetbaarheid van het voertuig beïnvloeden	15
3.1.2 Problemen die optraden bij het registreren van meetgegevens	16
3.1.3 Problemen met geregistreerde meetgegevens	16
3.2 Meetperiode van de voertuigen	16
3.3 Gegevensuitwisseling met NEA	18
3.4 Het verwerkingsprogramma	18
3.5 Resultaten	18
3.5.1 Laadgegevens	18
3.5.2 Implicaties voor de benutting van de capaciteit van het elektriciteitsopwekking- en distributiesysteem	19
3.5.3 Batterijtemperatuur	20
3.6 Technisch functioneren van voertuigen en componenten	21
3.7 Meetnauwkeurigheid	21
4. GEBRUIKSPATRONEN EN ENERGIEGEBRUIK	22
4.1 Algemene opmerkingen over de meetgegevens	22
4.2 Ritgegevens	22
4.3 De rollenbankmeting	24
4.4 Analyse van de eerste energiegegevens	25
4.5 De energiegegevens van de hele praktijkproef	27
5. NADERE ANALYSE ENERGIEGEBRUIK	30
5.1 Analyse van de energie gegevens van de hele praktijkproef	30
5.2 Het energiegebruik van LG-HB-27	36
5.3 Het terugwinnen van remenergie en de regeling van de elektromotor	38
6. VERGELIJKING ENERGIEGEBRUIK 'ELEKTRISCH' EN 'DIESEL'	41
6.1 Finaal energiegebruik en rendement van de aandrijflijn	41
6.2 Laadprocedures en de effecten op rendementen en het energiegebruik	41
6.2.1 Snelladen versus gewoon laden (nachtladen)	41
6.2.2 Rendementen van de batterij	42
6.2.3 Waterverbruik	42
6.3 Primair energiegebruik	43
6.4 Primair energiegebruik van de LG-HB-27	44
6.5 Primair energiegebruik van de LG-HB-24	47
7. CONCLUSIES	48
REFERENTIES	50
BIJLAGE: GRAFIEKEN OVERZICHT PER VOERTUIG	51

SAMENVATTING

De praktijkproef met elektrische Volkswagen Caravelles is eind 1995 gestart met 3 voertuigen. In de loop van de praktijkproef is het aantal voertuigen tot 12 uitgebreid. De VW Caravelle is een passagiersbusje met 7 zitplaatsen. De praktijkproef is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat en staat onder het beheer van Novem.

De belangrijkste reden voor de inzet van elektrische voertuigen ligt in het feit dat elektrische voertuigen ter plaatse van gebruik geen emissies produceren. Bij grootschalige inzet in stadsverkeer kunnen elektrische voertuigen dus significant bijdragen aan de verbetering van de luchtkwaliteit in stedelijke gebieden.

Doelstelling van de praktijkproef in algemene zin is het opdoen van ervaring met elektrische voertuigen in dagelijks gebruik. Het gaat daarbij echter niet alleen om gebruikerservaringen. De elektrische VW-Caravelles, die in deze proef worden gebruikt, zijn speciaal voor dit doel door de firma Spijckstaal ontwikkeld. Doel van de door ECN uit te voeren activiteiten is om, op basis van de tijdens de proef verzamelde ritgegevens, inzicht te verkrijgen in het functioneren van de gebruikte elektrische voertuigen. Daarbij gaat het niet alleen om directe gebruiksgegevens, zoals rit- en laadpatronen, en het technisch functioneren van voertuigen en componenten, maar vooral ook om de daaraan verbonden energieaspecten. Er zijn metingen verricht op 8 van de 12 ingezette voertuigen.

Rollenbanktest

De gegevens uit de praktijkproef zijn in eerste instantie vergeleken met de resultaten van de rollenbanktest die in 1995 met het prototype is uitgevoerd. De resultaten van de in de eerste fase van het project uitgevoerde rollenbanktest wezen uit dat de omgebouwde VW Caravelle zeer energiezuinig is. Het voor deze praktijkproef ontwikkelde voertuig lijkt dus significant zuiniger dan zijn conventionele tegenhanger. De resultaten zijn echter alleen geldig voor de nauwkeurig gedefinieerde testcycli waaraan het voertuig in de rollenbanktest is onderworpen. Het is van groot belang om experimenteel vast te stellen wat het energiegebruik in praktische gebruikssituaties is, en om inzicht te krijgen in hoe het energiegebruik afhangt van de toepassing waarvoor het voertuig wordt ingezet en het soort verkeer (stadsverkeer, buitenwegen, etc.) waarin het voertuig rijdt.

Data-acquisitie problemen

Het data-acquisitie systemen aan boord van de voertuigen heeft voor veel problemen gezorgd. Het eerste probleem met het data-acquisitie systemen aan boord van de voertuigen was het hoge stroomverbruik van de apparatuur zelf, waardoor de boord accu van het voertuig al volledig leeg kon raken na een lang weekeind van drie à vier dagen waarin niet werd gereden. Het gevolg hiervan was dat het voertuig na zo'n lang weekeinde niet meer kon rijden. Een zeer vervelende bijkomstigheid van het hoge energiegebruik van de dataregistratie apparatuur, was dat de in de apparatuur aanwezige back-up batterijen (drie stuks) ook leeg raakten. Hierdoor raakte de apparatuur al zijn voertuigspecifieke instellingen kwijt. Herprogrammeren van de instellingen door een specialist was dan noodzakelijk. Het verliezen van alle voertuigspecifieke instellingen betekende in de praktijk ook dat er geen dataregistratie meer plaatsvond, hetgeen pas duidelijk werd na 3 weken, bij wisseling van de cassette. Dit is één van de oorzaken dat er regelmatig bij alle voertuigen periodes zijn waar geen data registratie plaats gevonden heeft.

Een ander probleem met de dataregistratie kwam niet voort uit de apparatuur zelf. Het was de bedoeling om voor het laden van de batterij te registreren wanneer er geladen werd (begin en eindtijdstip), hoeveel energie er aan de batterij werd toegevoerd en om te detecteren wat voor soort lader er gebruikt werd. Voor het registreren van een aantal van deze gegevens was de

laadapparatuur gemodificeerd om pulsen af te geven. Deze pulsen waren echter zo krachtig dat de gevoelige elektronische besturing van de elektromotor van de Caravelle hierdoor beschadigd kon raken. Om zoveel mogelijke oorzaken van deze dure schades uit te sluiten is er besloten om de registratie van laadtijdstippen en type lader uit te schakelen. Het niet uitvoeren van de metingen over het laadgedrag, laad energie en type lader heeft in een aanzienlijk gemis aan data geresulteerd, die voor de bepaling van het energiegebruik eigenlijk onmisbaar waren. Schattingen hebben nu de plaats van metingen ingenomen.

Resultaten praktijkproef

De eerste metingen in de praktijk gaven een veel hoger energiegebruik dan op grond van de op de rollenbank gemeten waarden mocht worden verwacht. Bij het verdere verloop van de praktijkproef bleek al snel dat het energiegebruik in de tijd een dalende trend vertoonde. De lage waardes die uiteindelijk bereikt werden waren zelfs lager dan het gebruik gemeten tijdens de rollenbankmeting. Het zuinig rijden met de elektrische VW Caravelle is duidelijk een proces van gewenning.

Het energiegebruik van één van de elektrische VW Caravelles is in meer dan één opzicht uitzonderlijk. Het energiegebruik heeft gedurende vrijwel de hele periode van bijna drie jaar een dalende trend vertoond, maar tevens zijn erg lage waardes gemeten. Het laagste gemiddelde netto-energiegebruik (uit de batterij) kwam, voor een periode van drie weken, uit op 184 Wh/km. Over de laatste periode van acht maanden, kwam het gemiddelde energiegebruik op 199 Wh/km. Een eenduidige verklaring voor de gestage daling van de energiegebruikswaarden en de uiteindelijk bereikte lage waardes is moeilijk te geven. Een aantal zaken tezamen hebben voor het goede eindresultaat gezorgd. Het rijgedrag en de positieve instelling van de (vaste) chauffeur is zeer waarschijnlijk de belangrijkste factor.

Om de verschillen in energiegebruik van de verschillende deelnemers te verklaren is uitvoerig naar verklaringen gezocht. Het is opvallende dat er geen direct verband lijkt te zijn tussen gemiddelde snelheden en het energiegebruik. De meest waarschijnlijke verklaring is dat het een gevolg is van de elektromotorkarakteristiek. Een elektromotor is namelijk het meest efficiënt bij hoge toerentallen. De lengte van de ritten kan heel bepalend zijn voor het energiegebruik van een voertuig. De meeste voertuigen volgen de wetmatigheid dat naarmate de rit langer is het energiegebruik per km afneemt. Wel is het zo dat het effect afneemt naarmate de ritlengte toeneemt. De mogelijkheid tot het terugwinnen van remenergie is een belangrijke eigenschap van een elektrisch voertuig. Voor een elektrisch voertuig is het een methode om de actieradius (op één batterijlading) te vergroten. Energie terugwinpercentages van 5,9% tot 15,9% zijn gemeten.

Berekening van het energiegebruik

Een nauwkeurige berekening van het finaal energiegebruik (uit het stopcontact) is door het ontbreken van laadgegevens niet direct mogelijk. Het registreren van deze gegevens was wel gepland, maar uiteindelijk niet mogelijk gebleken. Door het ontbreken van laadgegevens is de van de lader betrokken energie onbekend. Om met de nu beschikbare gegevens het finaal verbruik uit te rekenen is behalve het rendement van de lader ook het laad/ontlaadrendement van de batterij nodig. Om toch beter inzicht te krijgen in het finale energiegebruik zijn door twee deelnemers aan de praktijkproef gedurende een langere periode meterstanden geregistreerd van het energiegebruik uit het elektriciteitsnet voor het laden van de tractiebatterij.

Voor de inschatting van primair energiegebruik van elektrische voertuigen kunnen verschillende methoden worden gehanteerd. De in deze studie toegepaste methode gaat uit van het gemiddeld rendement per kilowattuur (kWh) van het totale opwekkingspark (in dit geval in Nederland). Voordeel van deze methode is dat bij algemene vergelijkingen tussen elektrische en conventionele voertuigen geen informatie benodigd is over het tijdstip waarop de elektrische voertuigen hun accu's bijladen. Aangezien de oorspronkelijke doelstelling van het project om de laadtijdstippen en periodes te registreren niet gehaald is, is dit ook de meeste reële methode om naar het primaire energiegebruik te kijken.

Gedurende de periode waarover de metingen van energiegebruik uit het net werden gemeten is het feitelijke primaire energiegebruik van de elektrische VW Caravelle (LG-HB-27) hoger uitgekomen dan voor de conventionele diesel versie. De belangrijkste reden hiervoor is het feit dat de totale verliezen in het laadproces zo hoog zijn (55%). Ook als we uitgaan van de meest zuinigste periode, dan komt het primaire verbruik van de elektrische versie net iets hoger uit dan dat voor de diesel versie.

Het door de batterijfabrikant voorgeschreven laadproces van de tractiebatterij geeft op dit moment in de praktijk aanzienlijke verliezen. Een groot deel van de verliezen komt voor rekening van de dissociatie van water in de batterij. Hieruit blijkt dat er in het hele laadproces van de batterij op meerdere onderdelen verbetering mogelijk is, maar dat hiervoor nader onderzoek nodig zal zijn. Snelladen is een mogelijkheid om de laadverliezen te beperken, vooral omdat de tweede laadfase (het naladen) waarbij de dissociatie van water plaatsvindt, dan niet toegepast wordt.

1. INLEIDING

De praktijkproef met elektrische Volkswagen Caravelles is eind 1995 gestart met 3 voertuigen. In de loop van de praktijkproef is het aantal voertuigen tot 12 uitgebreid. De VW Caravelle is een passagiersbusje met 7 zitplaatsen. De praktijkproef is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat en staat onder het beheer van Novem.

Doelstelling van de praktijkproef in algemene zin is het opdoen van ervaring met elektrische voertuigen in dagelijks gebruik. Het gaat daarbij echter niet alleen om gebruikerservaringen. De elektrische VW-Caravelles, die in deze proef worden gebruikt, zijn speciaal voor dit doel door de firma Spijkstaal ontwikkeld. Een belangrijke doelstelling van het project is derhalve het verkrijgen van inzicht in de prestaties van de gebruikte technologieën en in hoe deze worden beïnvloed door de manier waarop het voertuig wordt gebruikt. Belangrijke deelaspecten daarbij zijn de prestaties en levensduur van de gebruikte batterijen en het energetisch rendement van de aandrijflijn, alsmede de daaruit voortvloeiende milieueffecten. De door het on-board meetsysteem geregistreerde gegevens maken het mogelijk deze aspecten nauwgezet te monitoren.

De beoogde resultaten van de metingen in het kader van de praktijkproef met de elektrische VW Caravelles omvatten:

- Een analyse van het gebruik van de elektrische voertuigen op basis van verzamelde ritkarakteristieken.
- Een analyse van het technisch functioneren van voertuigen en componenten, voor zover af te leiden uit de meetgegevens.
- Een analyse van het energetisch rendement van de in de voertuigen toegepaste aandrijflijn.
- Een analyse van aan de elektrische voertuigen toe te rekenen gebruik van primaire energiedragers.
- Analyse van het laadgedrag en implicaties voor het elektriciteitsopwekking- en distributiesysteem.

Uit de gedurende de gehele looptijd van het project verzamelde ritgegevens zal een goed beeld worden verkregen van de manier waarop de voertuigen door verschillende gebruikers, in verschillende transporttoepassingen en in de verschillende seizoenen worden gebruikt. Ook wordt inzicht verkregen in hoe de verschillende klimatologische omstandigheden gedurende de verschillende seizoenen de prestaties van de voertuigen beïnvloeden (bijv. effect van temperatuur op prestaties van de batterij).

De belangrijkste reden voor de inzet van elektrische voertuigen ligt in het feit dat elektrische voertuigen ter plaatse van gebruik geen emissies produceren. Bij grootschalige inzet in stadsverkeer kunnen elektrische voertuigen dus significant bijdragen aan de verbetering van de luchtkwaliteit in stedelijke gebieden. Voorts zijn elektrische voertuigen stiller dan conventionele voertuigen zodat ook een reductie van de geluidhinder in stedelijk gebied mag worden verwacht. Daar echter de overheid ook op nationale schaal scherpe doelstellingen heeft t.a.v. vermindering van energiegebruik en verbetering van het milieu, dient als een belangrijke randvoorwaarde gesteld te worden dat eventuele grootschalige inzet van elektrische voertuigen niet mag leiden tot een significante toename van het primair energiegebruik of de emissies van kool-dioxide en verzurende of anderszins luchtverontreinigende stoffen. Beter nog ware het wanneer elektrische voertuigen ook een positieve bijdrage zouden kunnen leveren aan energie- en milieudoelstellingen op nationaal niveau. Uit theoretische studies, waarin ondermeer het rendement en de emissies van elektriciteitsopwekking in rekening werden gebracht, is gebleken dat elektrische voertuigen ook in dit opzicht perspectieven bieden. Het is echter van groot belang om deze voorspellingen in de praktijk te toetsen aan voertuigen die worden ingezet in concrete transportfuncties. De onderhavige praktijkproef, waarin gebruik wordt gemaakt van realistisch ontwor-

pen voertuigen die zijn uitgerust met moderne state-of-the-art componenten, biedt daartoe uitstekende mogelijkheden.

2. HET MEETPROGRAMMA

2.1 De vorige praktijkproef

Reeds in de vorige door KNV gecoördineerde 'Praktijkproef met elektrisch aangedreven voertuigen', waarin tussen december 1990 en februari 1992 een zestal elektrische voertuigen in praktische gebruiksomstandigheden zijn beproefd, heeft ECN-Beleidsstudies de verwerking en interpretatie van meetgegevens uitgevoerd. De resultaten daarvan zijn gedocumenteerd in het ECN rapport 'Meetprogramma praktijkproef elektrisch aangedreven voertuigen', (Hilten, 1992). Aangezien de in de huidige proef gebruikte meet- en registratieapparatuur nagenoeg dezelfde is als in de vorige praktijkproef, is genoemd rapport illustratief voor een deel van de werkzaamheden welke ECN-Beleidsstudies voor dit project heeft uitgevoerd.

ECN-Beleidsstudies heeft voor de eerste fase van dit project reeds meetgegevens van door TNO-IW uitgevoerde rollenbanktesten verwerkt en geanalyseerd. De eerste resultaten verkregen uit de in het boordregistratiesysteem opgeslagen meetgegevens zijn vergeleken met de meetresultaten uit de bij de rollenbanktest gebruikte laboratoriumapparatuur (zie Paragraaf 4.4 op blz. 25). De belangrijkste resultaten komen later (zie Paragrafen 4.5 – 5.2) aan de orde.

T.a.v. de inschatting van effecten op energiegebruik en milieu kunnen verschillende methoden worden gehanteerd (zie Paragraaf 6.3 op blz. 43). Voor een beschrijving van de methode die uitgaat van gemiddeld rendement en gemiddelde emissies zij eveneens verwezen naar de ECN studie 'Elektrische auto's in het perspectief van de milieu- en energieproblematiek' (Smokers, 1992). De methode die uitgaat van het momentane energieverbruik en de momentane emissies, die moeten worden toegerekend aan de t.b.v. elektrische auto's extra geproduceerde elektriciteit, is gebruikt in de door de Sep uitgevoerde studie 'Energie- en milieuaspecten van elektrische voertuigen' (Sep, 1994).

2.2 Beschrijving van het data-acquisitiesysteem

De 'boardcomputer' die gebruikt wordt om data-acquisitie te verrichten aan boord van de VW Caravelle is ontwikkeld door de firma Fleetlogic Development and Production B.V. in Susteren. De door de boardcomputer geregistreerde gegevens worden op een datacassette (Logicbox) opgeslagen. Hierop kunnen de ritgegevens van enige weken worden opgeslagen. Gebruikers van de voertuigen dienen de volle cassettes door een lege te vervangen. De volle cassettes worden door de gebruikers opgestuurd naar ECN-Beleidsstudies. ECN-Beleidsstudies leest vervolgens de cassettes uit, slaat de meetgegevens op en verwerkt deze met de door haar ontwikkelde software. De cassettes worden daarna teruggestuurd naar de voertuiggebruikers.

De volgende gegevens worden door het on-board registratiesysteem opgeslagen:

Ritgegevens

- Begintijdstip en eindtijdstip van de rit (begin rit = 'contact aan', einde rit = 'contact uit').
- Stand van de kilometerteller aan het begin en het einde van een rit.
- Snelheidsprofiel per rit in termen van:
 - Maximale gereden snelheid gedurende de rit.
 - Snelheidsverdeling, uitgedrukt in de totale tijdsduur waarin werd gereden met een snelheid tussen twee grenswaarden in (stilstand, 1 - 20 km/uur, 21 - 50 km/uur, 51 - 80 km/uur, 81 - 120 km/uur, > 121 km/uur).

- Energiegebruik per rit in termen van:
 - Totale tijdens de rit door de batterij geleverde energie.
 - Totale tijdens de rit aan de batterij toegevoerde energie (t.g.v. regeneratief remmen).
- Tijdsduur gedurende welke de elektromotor in veld- danwel ankermode werd bedreven en tijdsduur gedurende welke werd geremd.

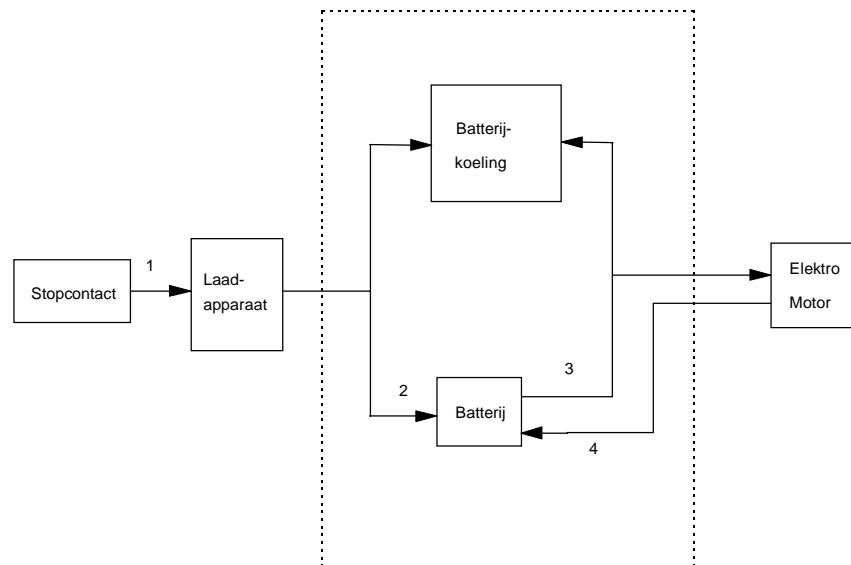
Batterijtemperatuur

- Begintijdstip en eindtijdstip van iedere periode waarin de batterijtemperatuur een grenswaarde ($< 0^{\circ}\text{C}$ danwel $> 30^{\circ}\text{C}$) overschrijdt.
- Maximale danwel minimale piektemperatuur welke gedurende de periode van overschrijding werd gemeten.

Oorspronkelijk was het ook de bedoeling om de volgende laadgegevens te registreren:

- Begintijdstip en eindtijdstip van iedere laadperiode (laadregime).
- Signalering van het type lader (normaal versus snellader).
- Totale aan de batterij toegevoerde energie gedurende de laadperiode (laadregime).

In de praktijk gaf de registratie van de laadgegevens zodanige problemen met de elektronische besturing van de elektromotor van de VW Caravelle dat deze meetmogelijkheid moest worden uitgeschakeld.



Figuur 2.1 Schematisch overzicht elektrisch systeem

De energiestromen in Figuur 2.1 zijn de volgende:

- De energie (in Wh) die vanuit het net wordt betrokken ('1').
- De energie die als gevolg van het laden de batterij ingaat ('2').
- De energie die van de batterij naar de motor en/of het batterijkoeling systeem gaat ('3').
- De energie die van de motor naar de batterij loopt, de 'teruggewonnen' remenergie ('4').

De uit het net betrokken energie ('1' in Figuur 2.1) en de energie die als gevolg van het laden de batterij ingaat ('2' in Figuur 2.1) zijn niet automatisch geregistreerd. Deze kunnen berekend worden door uit de energie die vanuit de batterij naar de motor gaat. Hiervoor is het nodig om aannames te doen over de rendementen van de lader en de batterij. Er hebben wel een aantal handmatige registraties van de uit het net betrokken energie plaats gevonden ('1' in Figuur 2.1).

Bij de energiemetingen moeten de volgende kanttekeningen gemaakt worden:

1. De onnauwkeurigheid van de berekeningen wordt bepaald door de onnauwkeurigheid van de afzonderlijke onderdelen (sensoren, interface tussen sensoren en boordcomputer en de boordcomputer zelf). De onnauwkeurigheid van de sensoren en de interface is niet bekend, de onnauwkeurigheid van de boordcomputer is 1%.
2. De gereden afstand zonder energiegebruik ('rollen') staat altijd op nul. Het systeem registreert dat de auto geen energie verbruikt voor het rijden als de stroom naar de motor onder een bepaalde grenswaarde komt. Deze grenswaarde kan niet op nul worden gezet aangezien er altijd wel een kleine stroom loopt. In de vorige praktijkproef is deze grenswaarde op 20 Ampère gezet. Aangezien in de data de gereden afstand zonder energiegebruik altijd op nul staat, kan geconcludeerd worden dat de stroom naar de motor nooit onder de 20 Ampère komt.
3. De energie die benodigd is voor het koelsysteem van de batterij wordt niet apart geregistreerd. De energie voor het koelsysteem is de energie die benodigd is om een pomp de koelvloeistof te laten rondpompen. In verhouding tot de energiestromen die van de batterij naar de elektromotor gaan mag de energie voor het koelsysteem worden verwaarloosd.

Bij de energie berekeningen zal, tenzij anders vermeld, worden uitgegaan van het Netto elektriciteitsverbruik per kilometer met terugwinning van de remenergie: '3' minus '4'.

Ten aanzien van het netto elektriciteitsverbruik dient opgemerkt te worden dat het elektriciteitsverbruik via de 12 V accu (voor data-acquisitie apparatuur, verlichting, ruitenwisser etc.) daarin inbegrepen is. Tijdens het laden wordt de voor het batterijkoelsysteem benodigde energie rechtstreeks uit het net betrokken. Deze energiestroom wordt niet apart gemeten (zie Figuur 2.1).

2.3 De verzamelde data

In dit verslag zijn meetdata verwerkt die afkomstig zijn van de volgende voertuigen:

LG-HB-23, die eerst bij de Rotterdamse Elektrische Tram (RET) in Rotterdam heeft gereden en overwegend voor het vervoer van schoolkinderen is gebruikt. Later heeft de LG-HB-23 voor korte tijd bij de Dienst Stedebouw en Volkshuisvesting, afdeling Vervoer, advies en ontwerp verkeersregistratie in Rotterdam gereden.

LG-HB-24, die voor de Provincie Zuid-Holland heeft gereden en een pendeldienst (personen) onderhield tussen twee dicht bij elkaar gelagen vestigingen van het provinciehuis in Den Haag.

LG-HB-25, die bij de RET in Rotterdam heeft gereden en in het begin voor het vervoer van schoolkinderen is gebruikt, maar die eind 1998 meer is ingezet om een pendeldienst (goederen) tussen verschillende vestigingen te onderhouden.

LG-HB-26, die aanvankelijk heeft gereden bij taxibedrijf L. Ham B.V. in Delft. Later is de LG-HB-26 bij het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in Petten gaan rijden voor het vervoer van bezoekers. Bij het ECN is daar later ook het gebruik als poolbus in het woonwerkverkeer bijgekomen om het voertuig meer te gebruiken en om zo meer ervaring met elektrisch vervoer op te doen.

LG-HB-27, die de hele periode bij taxibedrijf M. van der Putten en Zn. Beheer in Lisse heeft gereden en voornamelijk voor het vervoer van schoolkinderen is ingezet.

PL-DD-33 en PL-DD-35, die beide bij het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, afdeling Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) in Rotterdam hebben gereden. Ze zijn daar overwegend ingezet als poolbus voor twee groepen poolers die voorheen dieselbusjes gebruikten.

PL-DD-34, die bij taxicentrale Eltax in Leiden heeft gereden.

In tabelvorm ziet het er als volgt uit (Tabel 2.1). De periodes waarover data is verzameld zijn ook aangegeven. Hierbij dient echter de kanttekening te worden geplaatst dat er in de aangegeven periodes geen sprake is van een aaneengesloten periode van data. In de meeste gevallen zijn er één of meerdere korte of lange periodes geweest waarin de data acquisitie niet goed gefunctioneerde heeft. In Paragraaf 3.2 op blz. 16 wordt hier verder op in gegaan.

Tabel 2.1 *Overzicht van de verzamelde data*

Voertuig	Testlocatie	van datum	tot datum
Prototype	Rollenbank TNO	06/03/95	13/03/95
LG-HB-23	RET, Rotterdam	28/02/95	13/04/95 ¹
LG-HB-23	Dienst Stedebouw/Volkshuisv., Rotterdam	04/03/98	12/05/98 ²
LG-HB-24	Prov. Zuid-Holland, Den Haag	09/07/96	15/04/98 ³
LG-HB-25	RET, Rotterdam	03/03/97	15/06/98
LG-HB-26	Ham, Delft	13/12/95	08/11/96
LG-HB-26	ECN, Petten	02/03/98	27/01/99
LG-HB-27	Van der Putten, Lisse	13/12/95	22/10/98
PL-DD-33	Verkeer & Waterstaat - AVV, Rotterdam	03/03/97	15/01/99
PL-DD-34	Eltax, Leiden	12/03/98	30/09/98 ²
PL-DD-35	Verkeer & Waterstaat - AVV, Rotterdam	02/03/98	13/01/99

¹ De datum en het jaartal van deze registratie kloppen niet. Het jaartal moet 1996 zijn, de exacte periode is onbekend.

² De meetgegevens bevatten alleen rit gegevens. De gegevens over energiestromen zijn vanwege een niet te verhelpen storing in de data-acquisitie apparatuur niet geregistreerd.

³ Vanaf 05/03/98 zijn er geen energiegegevens geregistreerd.

3. DATA-ACQUISITIE

3.1 Problemen met de data-acquisitie

De data-acquisitie apparatuur aan boord van de voertuigen heeft gedurende het hele project bij alle deelnemers voor problemen gezorgd. De problemen zijn onder te verdelen in drie categorieën:

- Problemen die de betrouwbaarheid en inzetbaarheid van het voertuig beïnvloeden.
- Problemen die optraden bij het registreren van meetgegevens.
- Problemen met geregistreeerde meetgegevens.

3.1.1 Problemen die de betrouwbaarheid en inzetbaarheid van het voertuig beïnvloeden

Het eerste probleem met het data-acquisitie systemen aan boord van de voertuigen was het hoge stroomverbruik van de apparatuur zelf, waardoor de 12 Volt boord accu van het voertuig al volledig leeg kon raken na een lang weekeind van drie à vier dagen waarin niet werd gereden. Het gevolg hiervan was dat het voertuig na zo'n lang weekeinde niet meer kon rijden. Opladen van de boord accu was weliswaar voldoende om weer te kunnen rijden, maar het kwaad was al geschied.

Zoals aangegeven lag de oorzaak van deze problemen in het hoge energiegebruik van de data-acquisitie apparatuur, wat vooral bij het niet gebruiken van het voertuig tot problemen aanleiding kon geven. Dit probleem is niet voor de start van de praktijkproef onderkend, omdat de door de fabrikant van de apparatuur opgegeven verbruikswaarden vele malen lager waren dan de waarden die in de praktijk optraden. De fabrikant heeft de nog hogere initiële verbruikswaarden wel iets kunnen verlagen, maar de drie à vier dagen limiet bleek uiteindelijk het best haalbare. Hiervoor was het nodig om een boord accu met een hogere capaciteit te installeren op alle voertuigen.

De oplossing voor deze problemen was om het voertuig bij langere stilstand aan het laadapparaat te houden, ook als dat eigenlijk niet nodig was omdat de tractiebatterij vol zat. De laadapparatuur is hiervoor geschikt gemaakt. In de praktijk bleek dat het aan de lader houden van het voertuig, om wat voor reden dan ook, niet altijd mogelijk was. De problemen met het in gebruik nemen van een voertuig na een paar dagen stilstand bleven hierdoor voortbestaan.

Een tweede probleem met de dataregistratie kwam niet voort uit de apparatuur zelf. Het was de bedoeling om voor het laden van de batterij te registreren wanneer er geladen werd (begin en eindtijdstip), hoeveel energie er aan de batterij werd toegevoerd en om te detecteren wat voor soort lader er gebruikt werd. Er waren namelijk twee typen laders ontwikkeld voor de elektrische VW Caravelle: een gewone lader en een snellader. Voor het registreren van een aantal van deze gegevens was de laadapparatuur gemodificeerd om pulsen af te geven. Deze pulsen waren echter zo krachtig dat de gevoelige elektronische besturing van de elektromotor van de Caravelle hierdoor beschadigd kon raken. In de praktijk is het bij schades aan de besturingsapparatuur niet mogelijk geweest om de pulsen van de laadapparatuur als directe veroorzaker aan te wijzen. Echter om zoveel mogelijke oorzaken van deze dure schades uit te sluiten is er besloten om de registratie van laadtijdstippen en type lader uit te schakelen.

Het niet uitvoeren van de metingen over het laadgedrag, laad energie en type lader heeft in een aanzienlijk gemis aan data geresulteerd, die voor de bepaling van het energiegebruik eigenlijk

onmisbaar waren. Schattingen hebben nu de plaats van metingen ingenomen. In Paragraaf 3.5.1 op blz. 18 wordt nader ingegaan op de laadgegevens.

3.1.2 Problemen die optraden bij het registreren van meetgegevens

Een zeer vervelende bijkomstigheid van het hoge energiegebruik van de dataregistratie apparatuur, zoals beschreven in Paragraaf 3.1.1 op blz. 15, was ook dat na die drie à vier dagen stilstand, maar zeker bij een iets langere periode, de in de data-acquisitie apparatuur aanwezige back-up batterijen (drie stuks) ook leeg waren. Hierdoor raakte de apparatuur al zijn voertuig-specifieke instellingen kwijt. Herprogrammeren van de instellingen door een specialist was dan noodzakelijk.

Het verliezen van alle voertuigspecifieke instellingen betekende in de praktijk ook dat er geen dataregistratie meer plaatsvond, hetgeen pas duidelijk werd na 3 weken, bij wisseling van de cassette. Dit is één van de oorzaken dat er regelmatig bij alle voertuigen periodes zijn waar geen data registratie plaats vond.

Het verlies van dataregistratie aan het begin van de ingebruikneming van een elektrische VW Caravelle kwam ook een aantal keer voor. De oorzaak van de problemen met de dataregistratie aan het begin van een ingebruikneming lag ook aan de beschreven problemen met het energiegebruik van de apparatuur. Bij de aflevering van de elektrische VW Caravelle aan een nieuwe gebruiker was het in een aantal gevallen niet mogelijk om het voertuig gelijk in gebruik te nemen. Het voertuig werd een aantal dagen weggezet, waarna men er achter kwam dat het voertuig niet meer werkte. De nieuwe gebruikers waren nog niet volledig bekend met de procedures van het nieuwe voertuig en hadden verzuimd om het voertuig aan de lader te houden zolang het voertuig niet werd ingezet. Hierdoor zijn de problemen met dataverlies nooit helemaal opgelost.

3.1.3 Problemen met geregistreerde meetgegevens

De meting van de batterijtemperatuur, die moest registreren wanneer en hoelang een te hoge tractiebatterijtemperatuur optrad, heeft vooral een zeer groot aantal minieme temperatuuroverschrijdingen opgeleverd die zeer kort optraden.

Al die registraties bij elkaar zorgen er voor dat de datacassette zeer snel vol zit. Het wisselen van de cassette elke 3 à 4 weken is normaal gesproken een mooi interval omdat de cassette in die periode net vol raakt. Als er echter veel minieme temperatuur overschrijdingen zijn heeft dit tot gevolg dat de datacassette al na 1 à 2 weken vol zit met data. Als het wisselinterval op 4 weken blijft, geeft dit dataverlies. De data-acquisitie apparatuur heeft namelijk wel een intern geheugen, waar de data overflow in wordt opgeslagen als de cassette vol is, maar de capaciteit hiervan is beperkt.

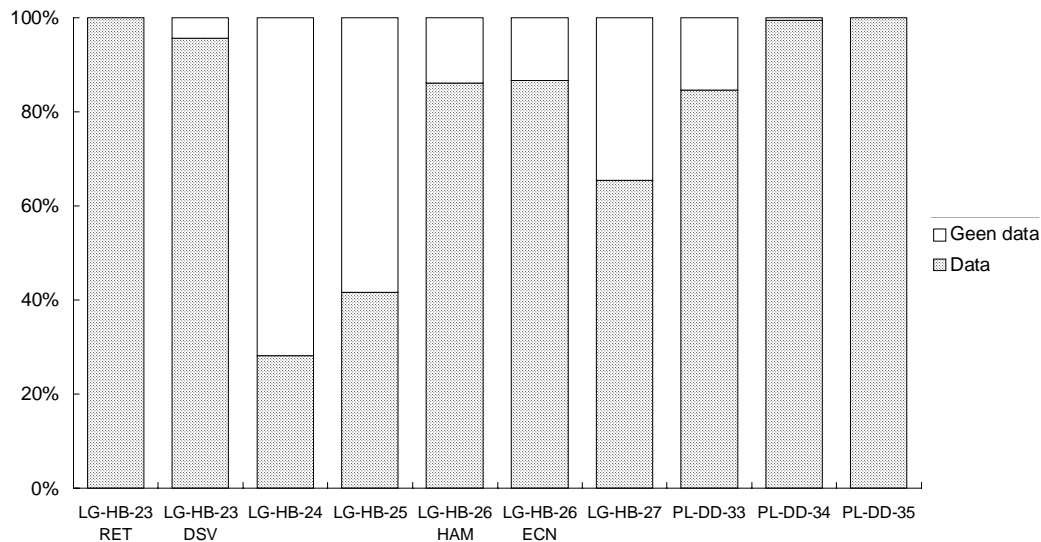
Het doel van de batterijtemperatuurmetingen was de volgende. Van de gebruikte Nikkel-cadmium tractiebatterij is bekend dat de levensduur kan afnemen als de batterijtemperatuur regelmatig boven de 30°C komt. De batterijtemperatuurmetingen waren nodig om in een later stadium van de praktijkproef een mogelijke relatie tussen de degradatie van de batterij en de frequentie van temperatuuroverschrijdingen te kunnen leggen. In Paragraaf 3.5.3 op blz. 20 wordt nader op de batterijtemperatuur ingegaan.

3.2 Meetperiode van de voertuigen

Van de eerste in gebruik genomen voertuigen is de eerste data geregistreerd op 13 december 1995. Het opstarten van een geregelde verzameling van de datacassettes en verwerking van meetgegevens heeft in de beginperiode vertraging opgelopen. Hierdoor zijn gegevens uit het begin van 1996 gedeeltelijk verloren gegaan. Het maken van duidelijke afspraken met alle par-

tijen om te komen tot een regelmatig verwisselen en opsturen van datacassettes heeft de problemen van toen opgelost.

Tabel 2.1 in Paragraaf 2.3 op blz. 14 geeft een overzicht van de verzamelde data per voertuig en deelnemer, echter de aangegeven data geven alleen de start en het eind van de dataverzameling. Er is een langdurige periode geweest waarin de dataregistratie bij vrijwel alle voertuigen gedurende een lange periode niet heeft gefunctioneerd. Vanaf medio 1997 tot ongeveer maart 1998 ontbreekt het bij de meeste voertuigen aan data. De problemen konden zo lang duren door een samenloop van omstandigheden. Er gaat enige tijd overheen voordat problemen gesignaleerd kunnen worden i.v.m. de periodiciteit van de wisseling van de datacassettes. De problemen bleken zeer divers en in een aantal gevallen niet eenvoudig op te lossen, waardoor het nodig was om de fabrikant van de apparatuur de reparatie te laten uitvoeren. Incidenteel zijn er buiten deze extreme periode een aantal gevallen geweest met data registratie problemen. Figuur 3.1 laat zien wat de procentuele verdeling is van de periodes waarin wel of geen dataregistratie plaats vond. De periode van start tot en met het eind van de data verzameling is 100%.



Figuur 3.1 *Overzicht van de dataregistratie periodes*

In principe hangt de duur van de registratieperiode die op één cassette past sterk af van het gebruik van het voertuig (iedere ritregistratie beslaat een tiental records ongeacht de ritlengte of duur) en van eventueel geregistreerde storings (bijv. diagnostics record van interne batterij of melding van temperatuuroverschrijdingen van de tractiebatterij). In de praktijk bleek dat vooral de registratie van temperatuuroverschrijdingen er voor zorgde dat de cassette vroegtijdig vol raakte. Bij de LG-HB-24 pasten er soms maar gegevens van één week op de cassette. Bij de LG-HB-24 is daarom herhaaldelijk een hiaat in de geregistreerde data gekomen, ondanks herhaalde pogingen om de situatie te verbeteren. Uiteindelijk bleek het uitschakelen van de batterij temperatuur registratie de enige oplossing. Ook bij andere partijen bleek de periode waarin de datacassette vol raakte zonder aanwijsbare redenen soms veel korter dan normaal.

In het projectplan is opgenomen dat meetgegevens gedurende de hele periode van ongeveer drie jaar zouden worden verzameld en verwerkt, maar dat een uitgebreide analyse alleen over de data van het eerste jaar zou plaats vinden en dat de analyse van de data verzameld in de periode daarna steekproefsgewijs zou worden bekeken. Echter, voor de eindrapportage is er voor gekozen om per gebruiker een analyse te maken over de volledige periode dat het voertuig is ingezet. De reden hiervoor is dat er maar bij één gebruiker sprake is van een periode van rond de drie jaar. En juist deze gebruiker heeft de beste (laagste) energiegebruikswaarden gerealiseerd, waarbij de hele periode interessant is. De andere gebruikers hebben beduidend korter met de voertuigen gereden, soms omdat men vroegtijdig is gestopt met deelname. Maar meestal was de

reden dat men pas later bij de praktijkproef betrokken raakte en dus later met de voertuigen ging rijden. De perikelen met de data-acquisitie apparatuur hebben de periodes waarover data beschikbaar is ook nog eens verkort.

3.3 Gegevensuitwisseling met NEA

Het monitoren van meer economisch en gebruikersgeoriënteerde aspecten is uitgevoerd door NEA. Voor koppeling met door NEA verzamelde gebruiksgegevens zijn de met het ritregistratiesysteem verzamelde ritgegevens in een daartoe geschikte vorm aan NEA ter beschikking gesteld. Het betrof hier met name de volgende gegevens:

- Ritkarakteristieken, zoals begin- en eindtijdstip, gereden afstand en snelheidsprofiel.
- Elektriciteitsverbruik, van belang voor berekening van de exploitatiekosten.

De rapportage door NEA is in februari 1997 uitgebracht (NEA, 1997).

3.4 Het verwerkingsprogramma

Voor de verwerking van de meetdata is gebruik gemaakt van nieuwe software die is ontwikkeld op basis van het database programma dat door ECN in het kader van de vorige praktijkproef is ontwikkeld. De oude software is omgezet naar ACCESS 2.0 voor Windows. Hierdoor wordt het aantal bewerkingsmogelijkheden vergroot. Het programma is aangepast aan de gewijzigde meetconfiguratie (toegevoegde meting temperatuuroverschrijdingen in de batterij, weglating van kilowattuurmeter voor het laadapparaat, wijziging van de laadregistratie).

Tevens is de verwerkingsprogrammatuur aangepast en uitgebreid om tegemoet te komen aan de nieuwe specificaties voor de huidige praktijkproef. In de eerste plaats is de verzamelde hoeveelheid data vele malen groter dan in de vorige praktijkproef, zodat verdergaande automatisering van dataverwerking en analyse gewenst was om de hanteerbaarheid van data en gebruikersvriendelijkheid te vergroten. Een ander belangrijk aspect, dat verschilt van de vorige proef, is de registratie van laadgegevens. Er is gewerkt aan aanpassingen van het registratiesysteem, waarmee het mogelijk zou moeten zijn om vast te leggen wanneer met welke lader (bijv. een snellader voor overdag of een langzame lader voor 's nachts) is bijgeladen. Ook het monitoren van de batterijtemperatuur is een nieuw aspect. Het uitlezen van de meetdata op de cassettes leverde op zich geen wezenlijke problemen op.

3.5 Resultaten

3.5.1 Laadgegevens

Het registreren van de laadgegevens heeft een lange voorgeschiedenis gehad die uiteindelijk niet het gewenste resultaat heeft opgeleverd. Er hebben gedurende het hele project geen automatische registraties plaatsgevonden die informatie over het laden bevatten. Op een gegeven moment is wel informatie verzameld over het laden door de kilowattuurmeters waar de laders aan gekoppeld waren uit te lezen. Hieronder een korte schets van de problemen.

Er is in het begin van het project gewerkt aan aanpassingen van het registratiesysteem, waarmee het mogelijk zou moeten zijn om vast te leggen wanneer en met welke lader (bijv. snellader voor overdag of langzame lader voor 's nachts) hoeveel energie is bijgeladen en ook met welke vermogens deze energie uit het net is betrokken. Deze vermogens zijn verschillend voor verschillende laadregimes. De aanpassingen van het registratiesysteem zijn wel gerealiseerd, maar ze zijn kort daarna uitgeschakeld.

In de eerste geanalyseerde bestanden ontbraken alle registraties ‘net ingestoken’, ‘net uitgetrokken’, ‘begin laden’ en ‘einde laden’. De energierecords werden wel gevonden voor wat laadgebeurtenissen hadden moeten zijn, maar ze bevatten onveranderlijk de waarde 0 voor de aan de batterij toegevoerde energie. Er viel dus erg weinig te zeggen over het laadgedrag van de gebruikers, noch over de geladen energie en de daarbij opgetreden verliezen. Het ontbreken van de meldingen ‘begin laden’ en ‘einde laden’ bleek het gevolg te zijn van het feit dat de laderkabel van de tot dan toe gebruikte lader te weinig kanalen bevatte om de genoemde gegevens naar het voertuig door te geven. Dit zou worden veranderd bij de nog op te leveren voertuigen.

Het was ook de bedoeling dat de registratie gebruikt zou gaan worden om onderscheid te maken tussen langzaam en snel laden en tussen de verschillende laadregimes van de laders. Daartoe diende de lader op het daartoe bestemde kanaal pulsen af te geven waarvan het aantal een begin of einde van een specifiek laadregime aan zou geven. De laders zijn op een gegeven moment aangepast zodat de juiste pulsen werden afgegeven. Echter in de praktijk bleek dat de elektronische besturing van de elektromotor van de Caravelle nogal storingsgevoelig was. Aangezien externe elektromagnetische invloeden mede verantwoordelijk werden gehouden voor de problemen met de elektronische besturing is toen besloten om de signaal functie van de laderkabel uit te schakelen. Men vermoedde dat de pulsen afgegeven door de laadapparatuur zo krachtig waren dat ze de elektronische besturing van de motor beïnvloeden en mogelijk zou kunnen beschadigen.

Door het ontbreken van gegevens over het laden kan geen goede conclusie worden getrokken over het laad- en ontlaadrendement van de batterij of het finaal energiegebruik betrokken uit het net. Oorspronkelijk was het ook de bedoeling om te bepalen in hoeverre de technische karakteristieken (bijv. capaciteit en laad/ontlaadrendement van de batterij) in de tijd zouden veranderen als gevolg van veroudering en gebruiksinvloeden. Ook dit is door de problemen niet mogelijk gebleken.

Een deel van de problemen is opgelost door in de laadapparatuur een kilowattuurmeter in te bouwen. Dit inbouwen is medio 1996 gerealiseerd en de gebruikers zijn middels een brief verzocht de kilowattuurmeter regelmatig uit te lezen en de gegevens samen met het waterverbruik van de batterij op te sturen. De kwaliteit, hoeveelheid en betrouwbaarheid van de op deze manier verkregen informatie is echter een stuk minder dan wat oorspronkelijk beoogd was.

3.5.2 Implicaties voor de benutting van de capaciteit van het elektriciteitsopwekking- en distributiesysteem

Oorspronkelijk was het de bedoeling om uit de registratie van laadperioden af te leiden in hoeverre elektriciteit uit het net wordt betrokken gedurende piek- respectievelijk daluren in de netbelasting. Er zou zelfs nog een aanpassing van het meetsysteem worden uitgevoerd waarmee de meting van deze aspecten kon worden verfijnd, om ook rekening te kunnen houden met de verschillende elektrische vermogens welke door de laadapparatuur in verschillende laadregimes tijdens de laadperiode worden afgenomen. Op grond van deze gegevens zouden inschattingen gemaakt kunnen worden van de mogelijke implicaties welke een toekomstige grootschalige inzet van elektrische voertuigen zou kunnen hebben op het distributienet. Ook zouden aanbevelingen kunnen worden geformuleerd welke zouden kunnen bijdragen aan een minimalisatie van mogelijke negatieve effecten. De metingen van de laadtijdstoppen en de laadvermogens hebben niet plaatsgevonden. Het is daarom niet zinvol om verder op dit onderwerp in te gaan. Als alternatief rest slechts een verwijzing naar een rapport van de Sep over de energie- en milieuaspecten van elektrische voertuigen (Sep, 1994), wat een goed overzicht geeft van het onderwerp. Een belangrijke conclusie van deze Sep studie was dat in Nederland in het jaar 2010 tot ongeveer 40% van het wagenpark door elektrische voertuigen vervangen zou kunnen worden zonder dat nieuwe (elektrische) opwekkingscapaciteit nodig zou zijn. Het voorbehoud dat gemaakt

werd was dat het laden van de batterij van de voertuigen volledig gestuurd zou moeten zijn en in het nachtdal zou plaatsvinden.

3.5.3 Batterijtemperatuur

Het meetsysteem bevat sensoren die de temperatuur van de tractiebatterij meten. Volgens opgave van Spijkstaal legt het registratiesysteem de tijd vast gedurende welke de batterijtemperatuur hoger is dan 30°C of lager dan 0°C en registreert het tevens de hoogst danwel laagst gemeten temperatuur en het tijdstip waarop die piektemperatuur optrad. Het meetbereik van de sensoren is -30°C tot +70°C. Bij het prototype was dit -50°C tot +50°C.

Al bij de eerste verzamelde meetgegevens rees het vermoeden dat er iets niet in orde was met ofwel de temperatuurmeting ofwel de registratie daarvan. De gegevens bevatten voor alle voertuigen talloze registraties van over- en onderschrijdingen die korter duren dan 1 seconde.

Bij de eerste batterij temperatuur metingen van de LG-HB-27, lagen de geregistreerde piektemperaturen bij zeer korte overschrijdingen meestal tussen de 30 en 31°C. Dit duidt op ruis in de meting. In het geval van overschrijdingen met een langere tijdsduur lag de temperatuur veelal hoger (31 tot 52°C). Onderschrijdingen kwamen een aantal keer voor, waarbij het steeds ging om een piektemperatuur van 0°C en een tijdsduur van 0 seconde.

Bij de eerste batterijtemperatuur metingen van de LG-HB-26 zag het beeld er heel anders uit. Ook hier kwamen veel ruisregistraties met een duur van 0 seconde voor. Meestal ging hier om onderschrijdingen met piektemperaturen tussen -0 tot -18°C. In twee gevallen werden overschrijdingen van 0 seconde met een piektemperatuur van + 70°C geregistreerd. In vier gevallen ging het om een overschrijdingen van 0 seconde met een piektemperatuur van iets meer dan + 30°C. Eindige temperatuur over- of onderschrijdingen van een oneindig korte duur zijn fysisch onmogelijk. Ook de lage temperaturen onder nul komen onwaarschijnlijk over.

In overleg met Spijkstaal en Fleetlogic is uitgezocht wat de oorzaak van deze problemen is. De conclusie van Fleetlogic was dat de temperatuurregistratie toch in orde was.

Uiteindelijk is in oktober 1996 besloten, na overleg met de fabrikant van de batterij, de firma Saft in Frankrijk, om de temperatuur waarbij een overschrijding geregistreerd wordt te verhogen naar 40°C. Het idee achter de batterijtemperatuur metingen is om een verband te kunnen leggen tussen overschrijdingen van een bepaalde voor de batterij schadelijke (over) temperatuur en de levensduur van die batterij. Navraag bij de batterijfabrikant leerde dat temperaturen tot 40°C toelaatbaar waren en geen nadelig effect op de levensduur zouden hebben. Eerdere berichten van de batterijfabrikant waren dat temperaturen boven de 30°C al schadelijk zouden kunnen zijn. Bij het onderzoek naar de hoge batterijtemperaturen bleek in de voertuigen een koellucht-kanaal te zijn waar jaloezieën in stonden die dicht waren en de luchtstroom tegenhielden. Deze jaloezieën hadden een functie bij de diesel versie, maar waren niet nodig bij de elektrische versie en zijn daarom verwijderd.

Ondanks het verhogen van de registratietemperatuur, waarbij sprake is van een overschrijding, zijn de batterijtemperatuur metingen onbetrouwbaar gebleven, zodat het effect op de levensduur van de batterij niet bepaald kan worden. Overigens is er gedurende de praktijkproef geen sprake geweest van achteruitgang van de prestaties van de tractiebatterij. De vraag is alleen of de limieten van de batterijprestatie wel vaak genoeg zijn benaderd. In Paragraaf 4.2 op blz. 22 waar de ritgegevens worden besproken is te zien dat aan de ene kant de elektrische VW Caravelle tot grote prestaties in staat is, maar dat in de praktijk de prestaties zelden volledig benut worden. De gemiddelde afstand die per dag wordt gereden is bij vijf voertuigen tussen de 28 en 45 km en bij de vijf andere voertuigen tussen de 60 en 94 km. Onder deze omstandigheden is het moeilijk, zonet onmogelijk, om een teruggang in de prestaties van de tractiebatterij waar te nemen.

3.6 Technisch functioneren van voertuigen en componenten

Oorspronkelijk was het de bedoeling om meetgegevens t.a.v. de batterijtemperatuur in de tijd te correleren aan rit- en laadgegevens, zodat inzicht zou worden verkregen in de mogelijke oorzaken van gemeten temperatuuroverschrijdingen. Gezien de problemen met de batterijtemperatuur meting is het niet mogelijk gebleken deze correlatie te onderzoeken. De relatie tussen hoge batterijtemperaturen en mogelijke negatieve effecten op de batterij levensduur zijn door de problemen niet onderzocht. De tractiebatterij heeft in alle voertuigen, op één kleine storing na, goed gefunctioneerd. Binnen Europa is de Nikkel-cadmium batterij de beste technologie die commercieel verkrijgbaar is. Ontwikkelingen en toepassingen in met name Japan gaan de richting op van andere batterijtechnologieën zoals Nikkel-metaalhydride (NiMH) en Lithium Ion (Li-ion), die een hogere energiedichtheid bezitten. Deze batterijen zijn in zelfs in Japan voor elektrische voertuigen zeer beperkt verkrijgbaar en zeer duur. Toepassing van deze batterijtechnologieën in Nederland is op dit moment zo goed als uitgesloten. Het is wel zo dat de firma Saft (Frankrijk) werkt aan de ontwikkeling van deze technologieën.

Tijdens de praktijkproef zijn in een aantal gevallen meetwaardes geregistreerd die duiden op problemen met de elektronische motorregeling of de motor zelf. Echter lang voordat de registraties geanalyseerd konden worden was het voertuig door de storing al buiten gebruik en was het bezoek van een monteur nodig. Achteraf kon met behulp van de meetgegevens alleen vastgesteld worden dat er iets met het voertuig niet in orde was geweest in de afgelopen periode.

3.7 Meetnauwkeurigheid

De ECN op dit moment ter beschikking staande gegevens geven weinig inzicht in de nauwkeurigheid van de gebruikte meet- en registratieapparatuur. Het is dus moeilijk om aan te geven hoeveel decimalen in de uitkomsten significant zijn of wat de foutenmarges zijn. Het verdient aanbeveling om in een vervolg aandacht te besteden aan de validatie van de gemeten resultaten.

Wel is door TNO aangetoond dat de gegevens van de data-acquisitie apparatuur voor het meten van de energiestromen van en naar de batterij binnen een marge van 1 à 2% overeenkwamen met door hun gemeten waarden tijdens metingen aan de batterij (Schillemans, 1995).

4. GEBRUIKSPATRONEN EN ENERGIEGEBRUIK

4.1 Algemene opmerkingen over de meetgegevens

De eerste bestanden van de voertuigen die in Delft en Lisse rondreden bevatten erg veel 'loze' registraties van ritten waarin 0,00 km of slechts enkele tientallen meters werd gereden. Bij loze registraties met een ritlengte van 0,00 km is waarschijnlijk alleen het contact omgedraaid, maar is het voertuig niet verplaatst. Deze registraties vertekenden niet alleen de ritgegevens, maar bleken ook vaak sterk afwijkende resultaten voor het energiegebruik op te leveren wanneer de ritlengte korter dan 0,50 km was. Om deze reden zijn in de analyses alle ritten korter dan 0,50 km buiten beschouwing gelaten.

4.2 Ritgegevens

Uit de ritgegevens zullen gemiddelden en totalen per rit, per dag, per week en/of per kilometer worden berekend. Deze cijfers zullen worden gebruikt voor de verdere analyse van ritpatronen en voertuiggebruik en voor de correlatie met metingen van energiegebruik.

De geaggregeerde ritgegevens zijn weergegeven in Tabel 4.1. Alleen ritten langer dan 0,50 km zijn in deze tabel opgenomen. Ritten van 0 km hebben geen betekenis, en ritten korter dan 0,50 km zijn hoofdzakelijk verplaatsingen van het voertuig op het eigen terrein van de gebruiker en geven dus geen inzicht in het nuttig gebruik van het voertuig (NEA, 1997). De minimale en maximale waarden van de ritgegevens zijn cursief. Voor het prototype zijn de ritgegevens weergegeven voor de gehele periode dat het voertuig op de rollenbank is getest.

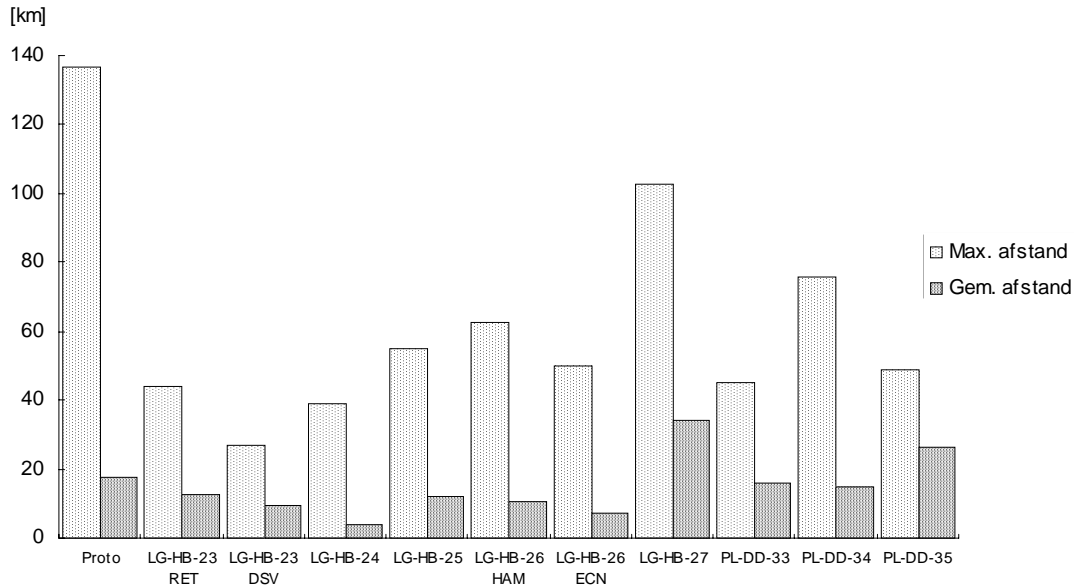
Tabel 4.1 *Een selectie van geaggregeerde ritgegevens (ritten >0,5 km)*

	proto	LG- HB-23 RET	LG- HB-23 DSV	LG- HB-24	LG- HB-25	LG- HB-26 HAM	LG- HB-26 ECN	LG- HB-27	PL- DD-33	PL- DD-34	PL- DD-35	
Max. aantal/dag	7	13	11	23	15	17	15	11	12	13	9	[ritten]
Max. afstand/dag	137	107	84	71	119	91	141	168	76	149	105	[km]
Gem. afstand/dag	70	60	28	43	64	45	30	94	45	82	67	[km]
Max. rijtijd/dag	457	210	162	324	266	262	229	389	141	410	169	[min.]
Max. ritlengte	137	44	27	39	55	62	50	103	45	76	49	[km]
Max. snelheid	120	116	102	116	116	130	108	118	127	113	126	[km/uur]
Gem. snelheid	23	29	28	14	28	23	27	26	35	21	44	[km/uur]
Gem. afstand/rit	17	12	9	4	12	10	7	34	16	15	26	[km]
Gem. rijduur/rit	46	26	20	16	26	27	15	79	27	42	36	[min.]

De geaggregeerde ritgegevens in Tabel 4.1 geven een goed overzicht van het gebruik van de voertuigen bij de verschillende gebruikers. Uit deze tabel blijkt dat de elektrische VW Caravelle tot grote prestaties in staat is. De rollenbank meting is hierbij niet helemaal representatief voor de praktijk. De praktijk levert echter voldoende extremen op. Met behulp van snelladers is het mogelijk om grote afstanden per dag af te leggen. In de praktijk is 168 km als maximale afstand per dag geregistreerd. Door de fabrikant van de elektrische VW Caravelle, de firma Spijkstaal, is al aangetoond dat afstanden van 300 km en meer mogelijk zijn, bij het gebruik van snelladers. Een maximale ritlengte van 103 km is ook een mooie waarde, zeker als men hierbij bedenkt dat er in principe nog energie aanwezig was om verder te rijden. Een maximale snelheid van 130 km/uur is hoger dan de opgave van de fabrikant.

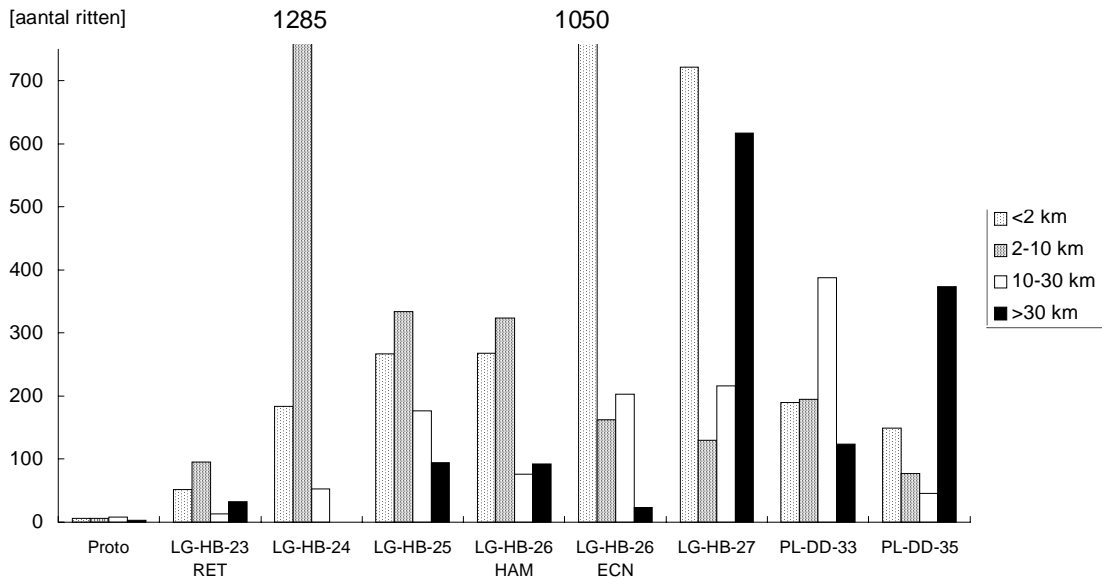
De gemiddelde afstand die per dag is gereden laat zien dat de prestaties van de elektrische VW Caravelle niet volledig benut zijn. De dagen waarop niet met de voertuigen is gereden zijn niet meegenomen in de berekening van de gemiddelden per dag. De LG-HB-27 (van der Putten) scoort hier overigens wel zeer goed met een gemiddelde gereden afstand per dag van 94 kilometer. Overigens is het geen negatief punt voor de elektrische VW Caravelle, omdat het niet volledig benutten van de mogelijke prestaties in meer of mindere mate voor elk voertuig zal gelden.

In Figuur 4.1 is een overzicht gegeven van de maximale en gemiddelde ritafstand per voertuig.



Figuur 4.1 Overzicht maximale en gemiddelde ritafstand per voertuig (ritlengte >0,5 km)

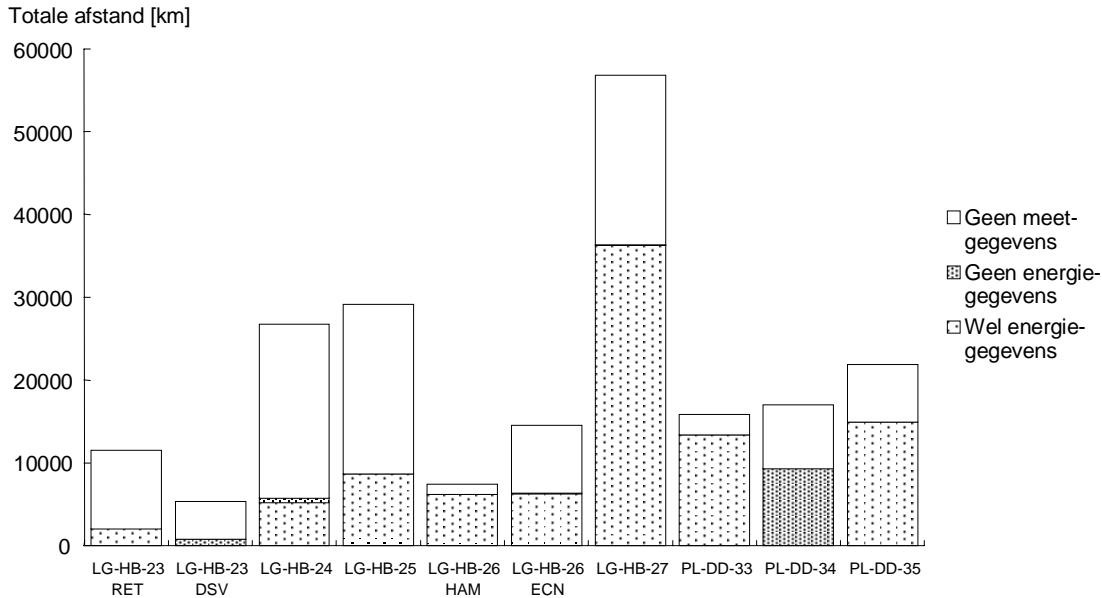
Een overzicht in aantal ritten per ritafstand is voor de elektrische VW Caravelles bij de verschillende gebruikers in Figuur 4.2 weergegeven.



Figuur 4.2 Overzicht aantal ritten per voertuig per ritafstand

Het overzicht in Figuur 4.2 laat een volledig overzicht zien voor welke afstanden de Caravelle precies gebruikt werd. Het gebruik voor vele korte ritten van de LG-HB-24 wordt bevestigd. Voor de LG-HB-26 (ECN) vallen ook de vele korte ritten op het eigen terrein op. De LG-HB-27 heeft opvallend veel lange ritten gemaakt, wat ook uit de gegevens in Tabel 4.1 op blz. 22 blijkt. Enige relativering van de getallen van de LG-HB-27 is op zijn plaats, omdat voor dit voertuig de data acquisitie periode het langst was. De vele lange ritten van de PL-DD-35 zijn de poolritten, waar het voertuig voornamelijk voor is ingezet.

In Figuur 4.3 is de totale afgelegde afstand per voertuig weergegeven, waarbij tevens is aangegeven over hoeveel kilometers er data is geregistreerd en of die data wel of geen energiegegevens bevatte.



Figuur 4.3 *Totale afgelegde afstand per voertuig en data registratie*

Het feit dat er over een groot deel van de kilometers geen dataregistratie heeft plaats gevonden, heeft niet alleen met de registratieperikelen te maken. Een deel van de gereden kilometers is buiten de periode van de metingen afgelegd.

4.3 De rollenbankmeting

De gegevens uit de praktijkproef zijn in eerste instantie vergeleken met de resultaten van de rollenbanktest die bij TNO in 1995 met het prototype is uitgevoerd.

De resultaten van de in de eerste fase van het project uitgevoerde rollenbanktest wezen uit dat de omgebouwde VW Caravelle zeer energiezuinig is (zie Tabel 4.2 op blz. 25). Uitgaande van een rendement voor elektriciteitsopwekking van 41% (representatief voor het gemiddelde opwekkendement in 1994) bedraagt het primair energiegebruik (d.w.z. betrokken op de energie-inhoud van de verbruikte primaire energiedragers als kolen, gas, olie en uranium) van het geteste voertuig in typische stadscycli tussen de 3,0 en 3,4 MJ/km. Voor een conventionele Volkswagen Caravelle met benzinemotor wordt door TNO voor dezelfde stadscycli een finaal verbruik van 3,6 MJ/km gemeten. Rekening houdend met de energieverliezen bij raffinage en distributie van benzine komt dit neer op een primair verbruik van zo'n 4,0 MJ/km. Het voor deze praktijkproef ontwikkelde voertuig lijkt dus significant zuiniger dan zijn conventionele tegenhanger. De toe te rekenen emissies van kooldioxide en verzurende stoffen zullen naar verwachting dus ook lager zijn dan van de benzine variant. De emissies van koolmonoxide, vluch-

tige organische stoffen en aerosolen als gevolg van elektriciteitsopwekking zijn in alle gevallen zeer laag. Genoemde cijfers zijn echter alleen geldig voor de nauwkeurig gedefinieerde testcycli waaraan de voertuigen in de rollenbanktest zijn onderworpen. Het is van groot belang om experimenteel vast te stellen wat het energiegebruik in praktische gebruikssituaties is, en om inzicht te krijgen in hoe het energiegebruik afhangt van de toepassing waarvoor het voertuig wordt ingezet en het soort verkeer (stadsverkeer, buitenwegen, etc.) waarin het voertuig rijdt.

4.4 Analyse van de eerste energiegegevens

De eerste ervaringen in de praktijk bleken energetisch aanmerkelijk minder gunstig uit te pakken dan de rollenbankmeting. Gedurende de praktijkproef bleek echter dat de gebruikswaardes in de meeste gevallen een gestage daling door maakten. Uiteindelijk werden waardes bereikt die, in een aantal gevallen, in de buurt kwamen van die geregistreerd werden bij de rollenbankmeting. Eén gebruiker is zelfs onder het lage energiegebruik niveau uitgekomen dat op de rollenbank is gemeten.

Het energiegebruik per kilometer kan met de gegeven meet- en registratieapparatuur slechts per rit worden vastgesteld. Uit de gegevens van individuele ritten is het gemiddelde energiegebruik over de gehele testperiode berekend. De eerste geaggregeerde resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.2. Alle energiekentallen zijn betrokken op de energiestromen die tijdens de ritten de batterij in en uit gaan. Het rendement van de lader is in deze gegevens dus nog niet meegenomen. Tevens is, alleen gekeken naar ritten langer dan 0,50 km. Voor het prototype dat op de rollenbank is getest zijn naast de gemiddelden voor de gehele meetperiode ook de resultaten weergegeven van metingen volgens de standaard cycli ECE-city (urban drive cycle) en ECE-new (combinatie van urban drive cycle en extra-urban drive cycle).

Tabel 4.2 *De eerste geaggregeerde energiegegevens*

	prototype 06/03/95 13/03/95	prototype ECE- City	prototype ECE- new	LG-HB-26 13/12/95 06/02/96	LG-HB-27 13/12/95 10/01/96	
Totaal geleverd	86			225	167	[kWh]
Totaal gewonnen	11			30	14	[kWh]
Gewonnen/geleverd	12,4	15,7	9,4	13,5	8,4	[%]
Gemiddeld geleverd/km	247	252	232	378	372	[Wh/km]
Gemiddeld gewonnen/km	31	40	22	51	31	[Wh/km]
Gemiddeld energiegebruik/km	216	212	210	327	341	[Wh/km]
Maximum geleverd/km	370			667	592	[Wh/km]
Minimum geleverd/km	230			61	310	[Wh/km]
Max. gewonnen/km	106			121	74	[Wh/km]
Min. gewonnen/km	12			10	13	[Wh/km]
Maximum energiegebruik/km	290			596	527	[Wh/km]

De hierna volgende analyse van de eerste resultaten heeft begin 1996 plaatsgevonden. Direct valt op dat het energiegebruik (uit de batterij, dus exclusief laadrendement van batterij en lader) van de in de praktijk geteste voertuigen beduidend hoger uitvalt dan wat gemeten is op de rollenbanktest (Tabel 4.2). T.o.v. de gemiddelde waarde uit de rollenbanktest is het energiegebruik in de praktijk tussen de 51 en 57% hoger. Behalve het gemiddelde is ook het piekgebruik hoger. Het maximaal gemeten energiegebruik in één rit valt tussen de 81 en 105% hoger uit dan in de rollenbanktest.

Uitgaande van een goed functioneren van de techniek zijn er voor een hoger gemiddeld energiegebruik de volgende verklarende factoren te bedenken:

- een hoger beladen gewicht van het voertuig,
- een hogere gemiddelde snelheid of hogere topsnelheden,
- snellere acceleraties,
- minder efficiënt gebruik van regeneratief remmen (LG-HB-27),
- invloed van de temperatuur op rendementen van componenten.

Op de rollenbanktest is een voertuiggewicht van 2540 kg gesimuleerd. Het ledig gewicht van de elektrische VW Caravelle is 2410 kg. De 130 kg verschil komen overeen met het gewicht van de bestuurder plus ofwel 40 à 50 kg bagage. Uit de rapportage van NEA blijkt dat het voertuig dat bij Ham, Delft in gebruik is per beladen rit gemiddeld 5 kinderen vervoert. Het voertuig dat bij van der Putten in Lisse in gebruik is vervoert per beladen rit 10 tot 12 kinderen. Uitgaande van een geschat gewicht van 35 kg per kind en 80 kg voor de bestuurder betekent dit, dat de beladen ritten bij Ham 125 kg en bij van der Putten 335 kg zwaarder zijn dan bij de rollenbanktest. Het energiegebruik bij Ham is iets lager dan dat bij van der Putten, maar niet genoeg om door het verschil in laadgewicht te kunnen worden verklaard.

Kijken we naar de gemiddelde snelheid dan zien we dat die in het geval van het voertuig in Delft (LG-HB-26) lager ligt dan het gemiddelde van de rollenbanktest, maar ongeveer gelijk is aan de gemiddelde snelheid voor de ECE-city cyclus (18 km/uur). Bij het voertuig in Lisse (LG-HB-27) ligt de snelheid hoger en is deze vergelijkbaar met de gemiddelde snelheid van de nieuwe ECE-cyclus (33 km/uur). Overigens was in de rollenbanktest de snelheid in de ECE-new cyclus beperkt tot 90 km/uur (normaal maximaal 120 km/uur) omdat het voertuig bij hoge snelheden de vereiste acceleratie niet kon halen. De snelheidsprofielen van de verschillende voertuigen wijken echter niet veel af van het gemiddelde van de rollenbanktest. Ook was in de rollenbanktest het gemiddeld energiegebruik voor de ECE-city en de ECE-new cyclus nagenoeg gelijk, ondanks het grote verschil in gemiddelde snelheid. Gemiddelde snelheid is dus geen duidelijke verklarende factor voor de hoge praktijkwaarden.

De maximale snelheid is in de praktijk lager geweest dan in de rollenbanktest, waar het voertuig verscheidene malen 120 km/uur heeft gehaald. De snelheidsprofielen laten voor Ham (LG-HB-26) een zeer lage bijdrage van snelheden boven 80 km/uur zien. Het voertuig bij van der Putten (LG-HB-27) heeft t.o.v. de rollenbanktest wel meer bij hoge snelheden gereden. Dit levert echter geen eenduidige verklaring voor het hogere energiegebruik op.

Acceleraties zijn niet gemeten. Wel heeft snel accelereren mogelijk een grote invloed op het maximaal gemeten energiegebruik per kilometer. Het rustig accelereren naar een bepaalde snelheid zal waarschijnlijk een lager (maximum) energiegebruik geven dan snel accelereren naar dezelfde snelheid. Met name bij het voertuig in Delft (Ham, LG-HB-26) valt deze parameter hoog uit. Aangezien het voertuig in Lisse (van der Putten, LG-HB-27) gemiddeld meer passagiers vervoert (11 tegen 5) geeft de hogere voertuigmassa geen verklaring voor het hogere piekverbruik.

Kijken we naar het percentage van gewonnen gedeeld door geleverde energie dan zien we dat het voertuig in Delft (LG-HB-26) een hoger terugwinpercentage haalt dan gemeten in de rollenbanktest. Het voertuig in Lisse (LG-HB-27) scoort hier beduidend slechter.

De meetperiode viel in een vrij strenge winter. Toch lijkt het onwaarschijnlijk dat temperatuur een verklarende factor is in het gemeten energiegebruik. Aangezien alleen is gekeken naar de energiestromen die tijdens het rijden de batterij in en uit gaan, heeft de temperatuurafhankelijkheid van het laad/ontlaadrendement van de batterij geen invloed. De effecten van temperatuur op de rendementen van vermogenselektronica en de elektromotor zijn voor zover bekend vrij gering.

Al met al konden we, na deze eerste metingen, voorzichtig concluderen dat het hogere energiegebruik van het voertuig in Delft (LG-HB-26) met name het gevolg moet zijn van harder optrekken in combinatie met een hogere beladingsgraad dan bij de rollenbanktest. In het geval van het voertuig in Lisse (LG-HB-27) is het een combinatie van een hogere beladingsgraad en een 'sportiever' rijgedrag met een minder efficiënte benutting van de mogelijkheid tot regeneratief remmen.

Zoals eerder genoemd heeft bovenstaande analyse vrij kort na de eerste metingen plaatsgevonden. In de loop van het project kon worden vastgesteld dat het energiegebruik bij de meeste gebruikers in de tijd een dalende trend vertoonde. Uiteindelijk zijn bij het voertuig in Lisse (LG-HB-27) gebruikswaardes gemeten die onder de rollenbank waardes uitkwamen. In Paragraaf 5.2 op blz. 36 zal hier verder op worden ingegaan.

4.5 De energiegegevens van de hele praktijkproef

Hieronder een overzicht van de geaggregeerde energiegegevens voor alle voertuigen waarop energiemetingen zijn verricht (Tabel 4.3). De belangrijkste getallen zijn die van het gemiddelde energiegebruik per km (netto). Het eerste getal in deze reeks is het getal van de rollenbankmeting (216 Wh/km). Zonder uitzondering zijn alle geregistreerde gebruikswaardes hoger. Dit geeft echter een verkeerd beeld, of in ieder geval een vertekend beeld. De gegevens in Tabel 4.3 zijn gemiddelden over de aangegeven periode. Niet zichtbaar in deze tabel zijn dalingen in het energiegebruik die zich in de tijd hebben voortgezet. Een verklaring voor de onderlinge verschillen in energiegebruik komt later in deze paragraaf aan de orde.

Tabel 4.3 *Overzicht geaggregeerde energiegegevens*

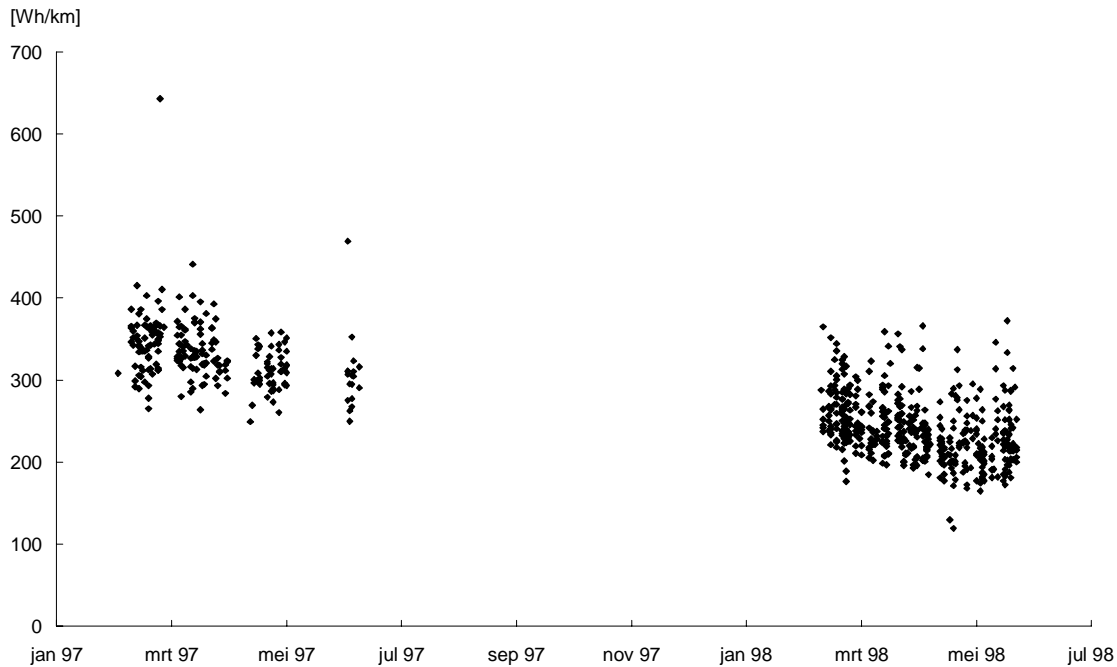
Energie	Proto	LG-HB-23 RET	LG-HB-24 PZH	LG-HB-25 RET	LG-HB-26 Ham	LG-HB-26 ECN	LG-HB-27 vdPutten	PL-DD-33 AVV	PL-DD-35 AVV	
Totaal geleverd	86	801	2196	2718	2222	1736	10644	4830	5012	[kWh]
Totaal gewonnen	11	107	350	296	295	172	1487	286	340	[kWh]
Gewonnen/geleverd	12,4	13,4	15,9	10,9	13,3	9,9	14,0	5,9	6,8	[%]
Gemiddeld geleverd/km	247	390	414	315	361	283	294	360	336	[Wh/km]
Gemiddeld gewonnen/km	31	52	66	34	48	28	41	21	23	[Wh/km]
Gem. Energiegebruik(netto)/km	216	338	348	281	313	255	253	339	313	[Wh/km]
Maximum geleverd/km	370	746	703	746	762	630	878	641	659	[Wh/km]
Minimum geleverd/km	230	303	0	124	0	3,5	24	0	258	[Wh/km]
Maximum gewonnen/km	106	111	116	111	133	183	139	70	154	[Wh/km]
Minimum gewonnen/km	13	17	0	0	0	0	0,8	0	0	[Wh/km]
Max. energiegebruik(netto)/km	290	643	616	642	660	559	738	621	569	[Wh/km]
Min. energiegebruik(netto)/km	206	280	0	119	52	3,5	23	252	247	[Wh/km]

De waardes in de Tabel 4.3 zijn gemiddelden over de hele periode waarover data is verzameld. Bij de meeste gebruikers is er sprake van een daling in het energiegebruik in de tijd. Maakt men onderstaande tabel opnieuw waarbij voor een aantal voertuigen de dataregistratie periodes onderverdeeld zijn, dan komt er al een heel ander beeld naar voren. Voor de voertuigen LG-HB-25 en LG-HB-27 zijn in de waarnemingen twee periodes te onderscheiden, die helaas gescheiden zijn door een periode waarin geen dataregistratie plaats vond. Deze twee afzonderlijke periodes per voertuig geven een heel ander beeld dan het gemiddelde over de twee periodes tezamen. In Tabel 4.4 zijn de twee periodes per voertuig weergegeven.

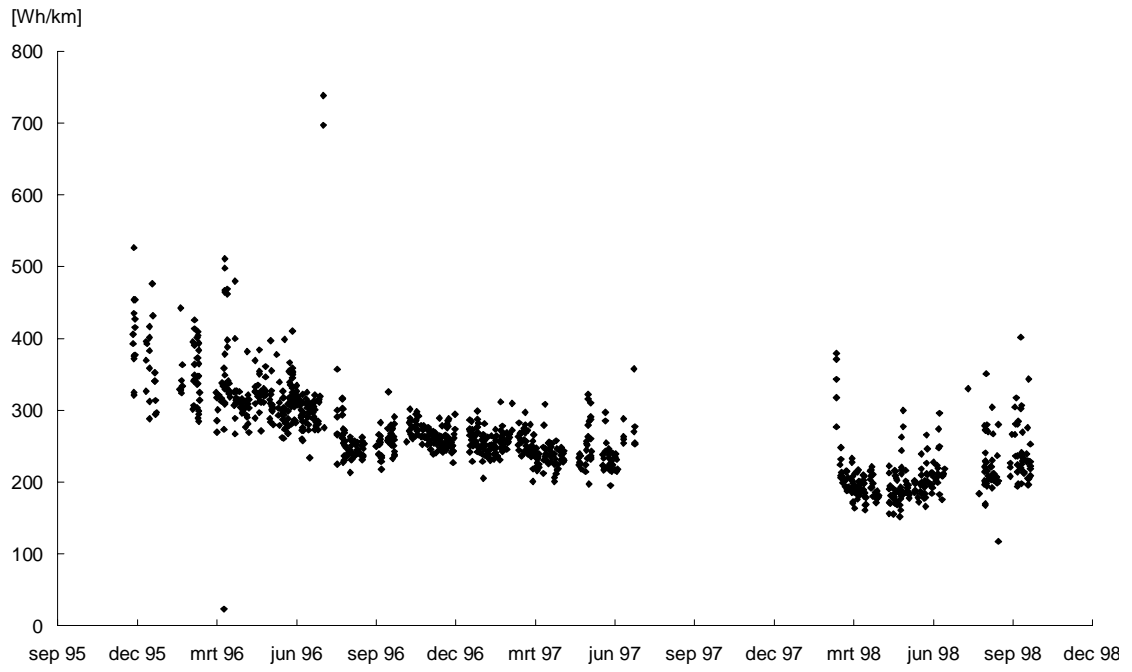
Tabel 4.4 *Geaggregeerde energiegegevens LG-HB-25 en LG-HB-27*

	Prototype rollenbank	RET LG-HB-25	RET LG-HB-25	vdPutten LG-HB-27	vdPutten LG-HB-27	
	06/03/95	03/03/97	05/03/98	13/12/95	13/12/95	
	13/03/95	07/07/97	15/06/98	22/10/98	22/10/98	
Totaal geleverd	86	1197	1098	8126	2539	[kWh]
Totaal gewonnen	11	118	117	1087	419	[kWh]
Gewonnen/geleverd	12,4	9,9	11,7	13,4	16,5	[%]
Gemiddeld geleverd/km	247	366	257	316	238	[Wh/km]
Gemiddeld gewonnen/km	31	36	27	42	39	[Wh/km]
Gem. Energie-gebruik/km (netto)	216	330	230	274	199	[Wh/km]
Gem. Energie-gebruik reductie			30		27	[%]

Nog interessanter is het om de ontwikkeling van het energiegebruik in de tijd gedetailleerder te bekijken. Voor beide voertuigen is in volgende grafieken het energiegebruik over alle ritten in de tijd uitgezet. Overigens zijn de grafieken ook onderdeel van een overzicht per voertuig van een aantal trends in het energiegebruik die in de bijlage is opgenomen. Duidelijk is te zien dat bij de LG-HB-25 in de periode in 1997 ook een dalende trend in het energiegebruik zichtbaar is, die denkbeeldig naar de periode in 1998 doorgetrokken kan worden. De daling in het gemiddelde energiegebruik van 30% voor de tweede periode vergeleken met de eerste periode is goed zichtbaar. Voor de LG-HB-27 is de dalende trend ook heel duidelijk te zien. Minder duidelijk is dat het gemiddelde energiegebruik in de tweede periode zoveel lager is dan in de eerste periode, terwijl de reductie met 27% niet veel minder is dan bij de LG-HB-25.



Figuur 4.4 *Energiegebruik van de LG-HB-25 in de tijd (alle ritten)*



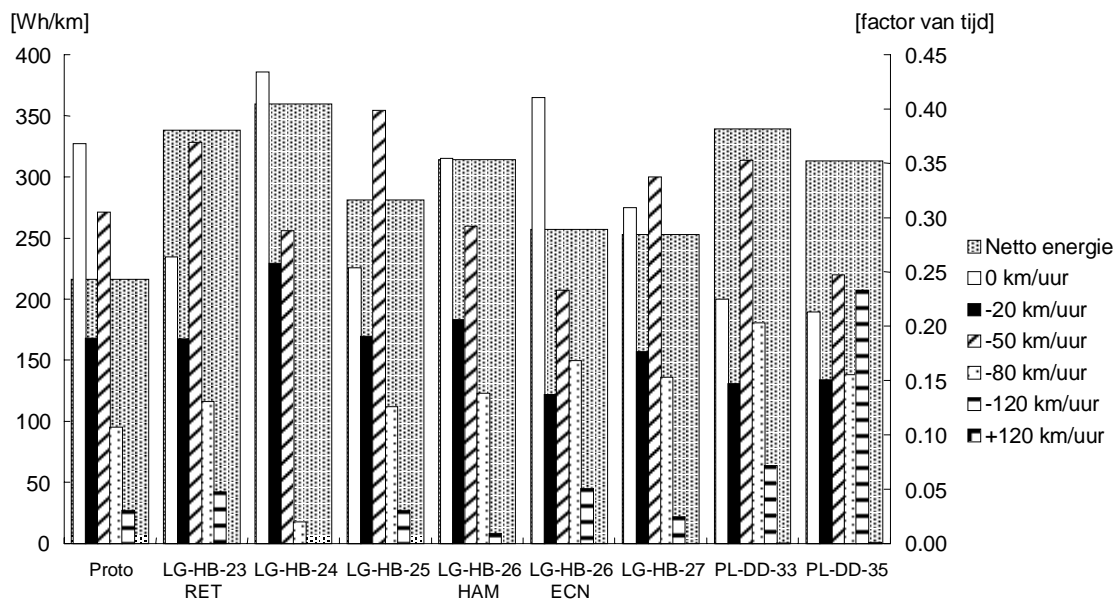
Figuur 4.5 *Energiegebruik van de LG-HB-27 in de tijd (alle ritten)*

5. NADERE ANALYSE ENERGIEGEBRUIK

5.1 Analyse van de energie gegevens van de hele praktijkproef

De eerste metingen in de praktijk gaven een veel hoger energiegebruik dan op grond van de op de rollenbank gemeten waarden mocht worden verwacht. Bij het verdere verloop van de praktijkproef bleek al snel dat het energiegebruik in de tijd een dalende trend vertoonde. Vooral bij de LG-HB-27 (van der Putten in Lisse) heeft de dalende trend zich vrijwel tot het eind doorgezet. De lage waarden die uiteindelijk bereikt werden waren zelfs lager dan het gebruik gemeten tijdens de rollenbankmeting. Het zuinig rijden met de elektrische VW Caravelle is duidelijk een proces van gewenning. Het door de chauffeur onderkennen dat een elektrisch voertuig anders is dan een conventioneel voertuig en anders gereden moet worden speelt hierbij een belangrijke rol. In het algemeen is de ervaring en inzet van een chauffeur een voorwaarde om uiteindelijk zulke lage energiegebruik waarden te bereiken. Zaken die invloed hebben op het energiegebruik zijn het moment van overschakelen naar een hogere versnelling en het optimaal benutten van de mogelijkheid om remenergie terug te winnen. Om zuinig te rijden moet het overschakelen bij een elektrisch voertuig later gebeuren, m.a.w. bij een hoger motortoerental, dan bij een dieselvoertuig. In tegenstelling tot een dieselmotor is een elektromotor bij hoge toerentallen het zuinigst. Het optimaal benutten van de mogelijkheid om remenergie terug te winnen vraagt van de chauffeur een meer anticiperend rijgedrag, waardoor het langzaam remmen op de elektromotor mogelijk wordt.

In Figuur 5.1 is een overzicht gegeven van het netto energiegebruik van alle voertuigen waar energiemetingen van zijn, tezamen met de snelheidsverdeling van alle ritten bij elkaar voor de hele meetperiode. Een eerste indicatie voor de verschillen in verbruik zit hem in de verschillen tussen de gereden snelheden. De snelheden zijn weergegeven als een factor van tijd, betrokken op de totale ritduur van alle ritten inclusief eventuele stilstand.



Figuur 5.1 Overzicht netto energiegebruik en snelheidsverdeling per voertuig

Bij de rit met de prototype (op de rollenbank) valt naast het lage energiegebruik op dat er sprake is van veel stilstand en dat er veel gereden is in de snelheidssegment tot 50 km/uur. De rollen-

bank meting bestond voornamelijk uit het rijden van gestandaardiseerde (ECE) ritcycli die een stadssituatie nabootsen. De zogenaamde 'extra urban' (ECE) ritcyclus is ook gereden, waardoor er ook registraties in het segment tot 120 km/uur zijn.

Het energiegebruik van de LG-HB-23 is vrij hoog, maar de snelheidsverdeling laat geen extremen zien.

De LG-HB-24 is ingezet als pendelbus tussen twee vestigingen van het provinciehuis voor Zuid-Holland in Den Haag, die op een paar kilometer afstand van elkaar liggen. Uit de grafieken van alle voertuigen (zie bijlage) is duidelijk te zien dat het energiegebruik bij korte ritten hoger ligt dan bij lange ritten. Tevens is te zien dat de spreiding op het energiegebruik voor korte ritten groter is dan voor lange ritten. Het gevolg hiervan is dat het energiegebruik per kilometer voor een korte rit hoger is dan voor een langere rit. Dit is de verklaring van het hoogste energiegebruik van alle deelnemende voertuigen. Gedurende slechts 2% van de ritduur komt de snelheid boven de 50 km/uur uit.

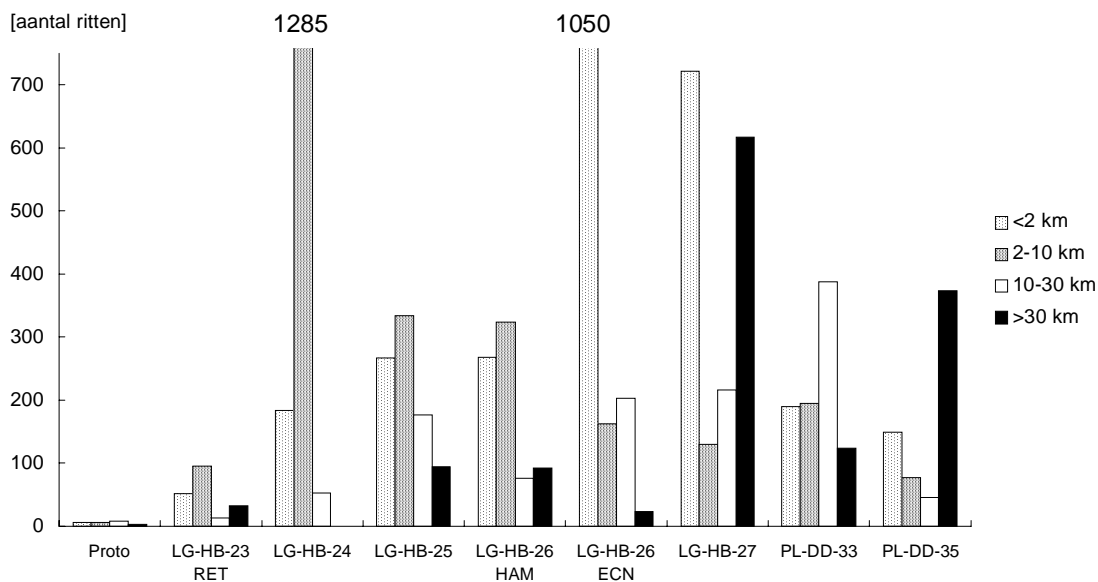
De LG-HB-25 en de LG-HB-26 bij Ham vertonen geen bijzonderheden.

De LG-HB-26 bij ECN heeft een laag energiegebruik waarbij opvalt dat er sprake is van veel stilstand en dat het snelheidssegment tot 50 km/uur ondervertegenwoordigd is. De segmenten tot 80 en tot 120 km/uur zijn goed vertegenwoordigd. Dit beeld komt overeen met het gebruik van het voertuig voor korte ritten op het eigen terrein en het gebruik in de directe omgeving die vooral bestaat uit provinciale wegen.

De LG-HB-27 kan zonder twijfel de energiezuinigste genoemd worden en zal daarom nog nader geanalyseerd worden. Uit de snelheidsverdeling voor de hele periode is alleen het snelheidssegment tot 120 km/uur in vergelijking laag te noemen.

De PL-DD-33 en PL-DD-35 worden beide met name gebruikt als poolauto in de ochtend- en avondspits tussen de woonplaats buiten Rotterdam en het kantoor in het centrum van Rotterdam. Met beide voertuigen wordt sneller gereden dan de overige voertuigen, waarbij met name de PL-DD-35 zich zeer veel in de snelheidsregionen tot 80 en 120 km/uur bevindt (37% van de ritduur). De PL-DD-33 brengt een groter deel van de tijd door in de binnenstad (tot 50 km/uur) en op de provinciale weg (tot 80 km/uur).

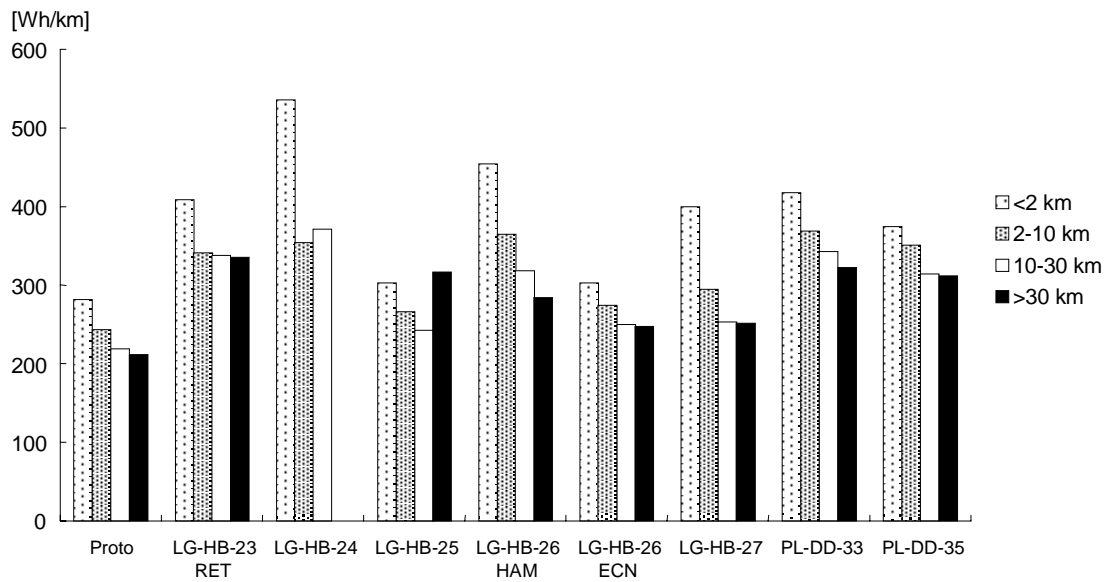
De verschillen in energiegebruik van de voertuigen laten zich niet alleen verklaren uit de tijd die gereden is in de aangegeven snelheidsregimes. De lengte van de ritten kan ook heel bepalend zijn voor het energiegebruik van een voertuig. Om hierover uitspraken te doen is het eerst nodig om te weten wat de ritverdeling is voor de verschillende voertuigen. In Figuur 5.2 is een overzicht gegeven per voertuig van het aantal ritten in een bepaalde afstandscategorie, deze grafiek is gelijk aan Figuur 4.2 op blz. 23 maar is hier nogmaals weergegeven. Daarna kunnen met behulp van een overzicht van het energiegebruik per ritlengte en per voertuig de conclusies worden bevestigd (Figuur 5.3).



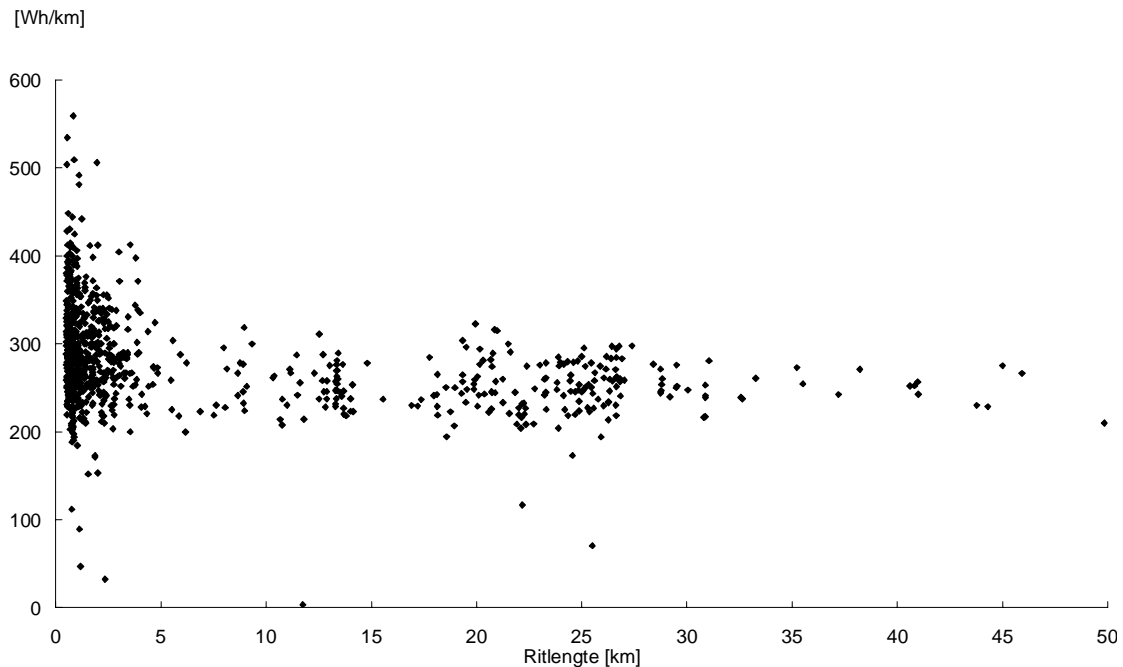
Figuur 5.2 *Overzicht aantal ritten per voertuig per ritafstand*

Een aantal voertuigen vallen wat ritlengteverdeling op. De LG-HB-24 heeft erg veel korte ritten (2-10 km) gereden, de gemiddelde ritlengte voor de hele periode komt uit op 3,9 km. De LG-HB-26 bij ECN maakt veel korte ritten op het eigen terrein. De LG-HB-27 maakt ook veel korte ritten, maar wat veel opvallender is het aantal ritten van meer dan 30 km. Dit hoge aantal lange ritten komt niet alleen door de lange periode waarover data is verzameld, maar de gemiddelde afstand per rit is met 34 km het hoogst gemeten van alle voertuigen. De gemiddelde ritduur is ook het hoogst met 79 minuten. De verschillen tussen de PL-DD-33 en PL-DD-35 zijn opvallend. Ondanks dat beide met name voor het woon-werk verkeer worden gebruikt zijn de lange poolritten bij de PL-DD-35 duidelijk in de meerderheid. Naast deze poolritten wordt de PL-DD-35 weinig gebruikt. Uit een analyse van de gegevens van de PL-DD-33 bleek dat de poolrit vooral 's ochtends nogal eens in kortere stukken uiteenviel omdat tussentijds het contact uitgezet werd (registratie van einde rit), waarschijnlijk om even te wachten op mede poolgenoten. De PL-DD-33 is ook meer ingezet voor ander soort ritten, wat bleek uit de rittijdstippen buiten de ochtend- en avondspits. Alleen veel korte ritten geeft een hoger gemiddeld energiegebruik (LG-HB-24). Bij een combinatie van veel korte ritten en relatief veel lange ritten slaat de balans toch door in het voordeel van de lange ritten, aangezien het totale energiegebruik van alle lange ritten vele malen hoger is dan van de korte ritten bij elkaar. Het lagere energiegebruik van de PL-DD-35 t.o.v. de PL-DD-33 komt vooral door het hoge aandeel lange ritten.

Het verschil in energiegebruik per ritlengte en per voertuig is in Figuur 5.3 weergegeven.

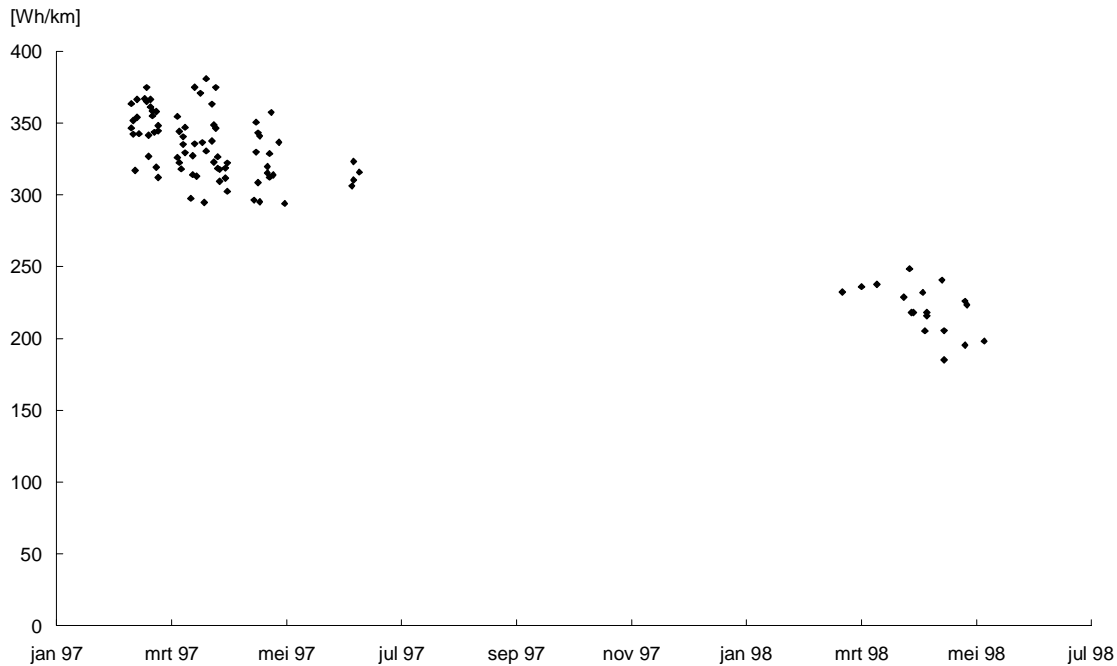


Figuur 5.3 Overzicht netto energiegebruik per ritlengte en voertuig



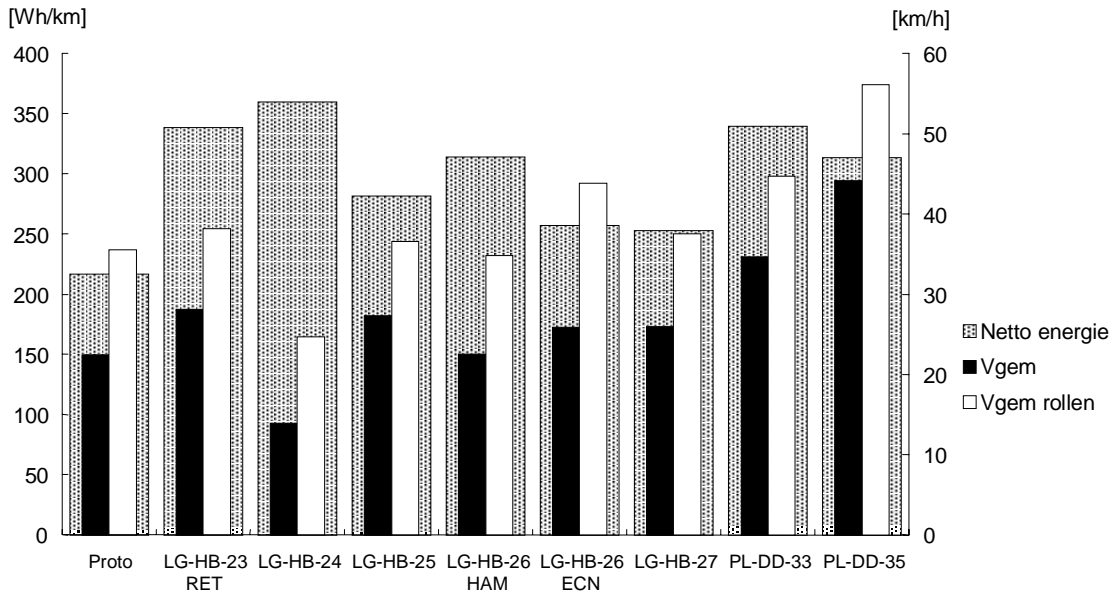
Figuur 5.4 Energiegebruik van de LG-HB-26 (ECN) als functie van ritlengte (ritten >0,5 km)

De meeste voertuigen volgen de wetmatigheid dat naarmate de rit langer is het energiegebruik per km afneemt. Als voorbeeld is het energiegebruik van de LG-HB-26 (ECN) als functie van de ritlengte in Figuur 5.4 weergegeven. Wel is het zo dat het effect afneemt naarmate de ritlengte toeneemt, zoals voor de LG-HB-26 (ECN). De LG-HB-24 volgt deze wetmatigheid niet helemaal, maar bij de LG-HB-25 is zeker sprake van een trendbreuk. Bij de LG-HB-25 hebben de lange ritten een hoger verbruik per kilometer dan de andere ritlengtes. Een verklaring hiervoor is dat de lange ritten vooral in de eerste periode van dataregistratie vielen, een periode waar het gemiddelde energiegebruik per km een stuk hoger was dan in de tweede periode. Dit is in Figuur 5.5 goed te zien. Het aantal punten, dit zijn ritten langer dan 30 km, is in de eerste periode veel groter dan in de tweede periode en het energiegebruik is in de eerste periode ook veel groter.



Figuur 5.5 *Energiegebruik van de LG-HB-25 in de tijd (ritten >30 km)*

Een volgende mogelijkheid om de verschillen te verklaren is de gemiddelde snelheid gedurende een rit. Hierbij is een onderscheid gemaakt in twee soorten gemiddelde snelheid. De gemiddelde snelheid van de hele rit, inclusief de tijd die stilstaand is doorgebracht (V_{gem}) en de gemiddelde snelheid van een rit waarbij de stilstand niet is meegenomen ($V_{gem\ rollen}$).

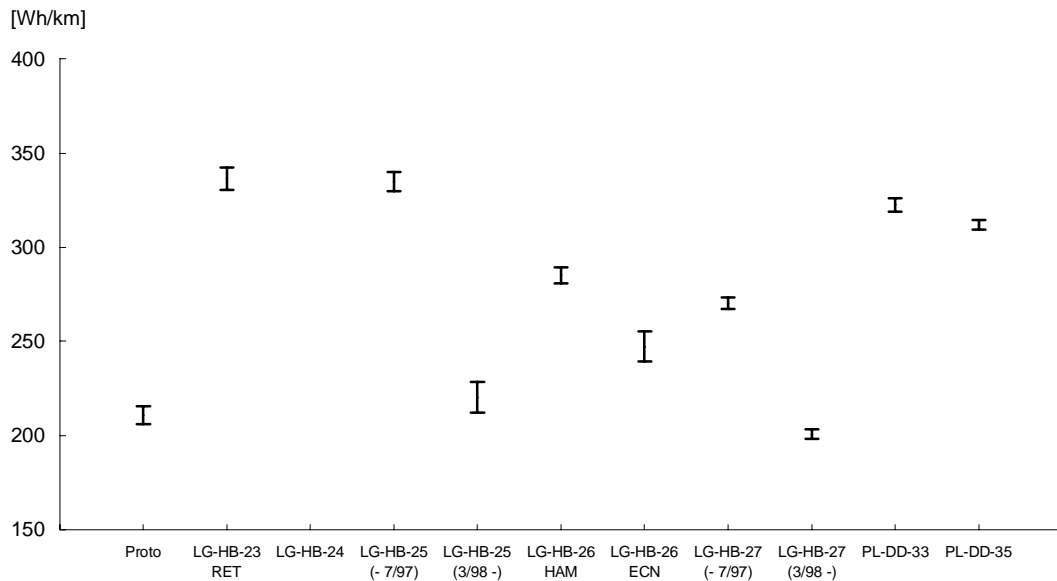


Figuur 5.6 *Overzicht netto energie en gemiddelde snelheid per voertuig (alle ritten)*

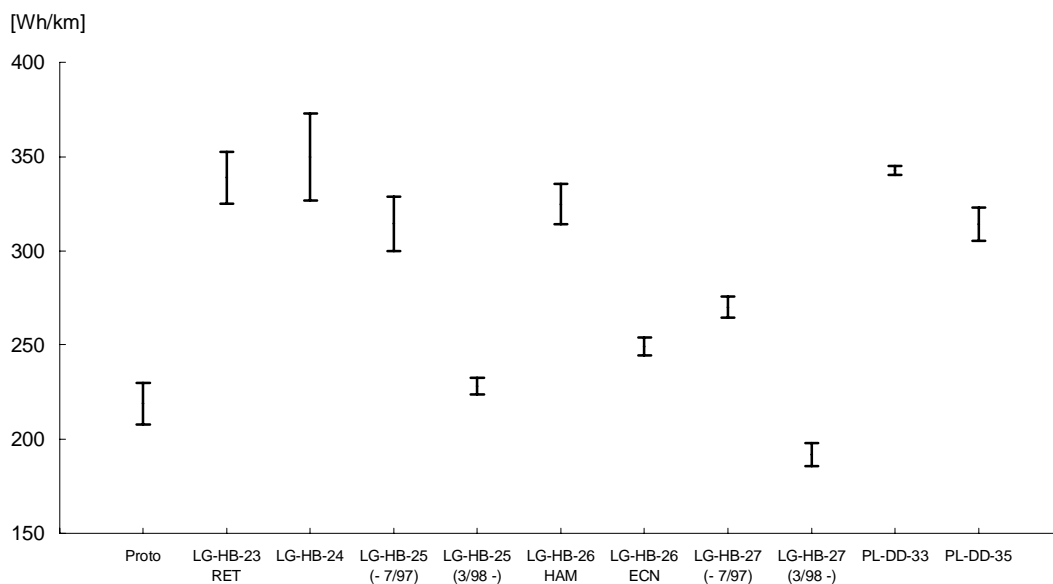
Opvallend zijn de lage gemiddelde snelheden voor de LG-HB-24, maar dit komt door de erg korte gemiddelde ritlengte van 3,9 km. Aan de andere kant is er de PL-DD-35 met een gemiddelde snelheid van bijna 45 km/uur (incl. stilstand) en een gemiddelde rolsnelheid van 57 km/uur (excl. stilstand). Het meest opvallende is eigenlijk dat er geen direct verband lijkt te zijn tussen gemiddelde snelheden en het energiegebruik. Helemaal te verklaren is het niet, maar de meest waarschijnlijke verklaring is dat het een gevolg is van de elektromotorkarakteristiek. Een elektromotor is namelijk het meest efficiënt bij hoge toerentallen. Om een hoge gemiddelde

snelheid te halen zal het nodig zijn om in elke versnelling lang door te trekken, waardoor bijna automatisch met hoge toerentallen wordt gereden. In de bijlage is voor elk voertuig ook een grafiek opgenomen waar de gemiddelde snelheid (incl. stilstand) tegen het energiegebruik is uitgezet. Deze grafieken laten ook zien dat met toenemende gemiddelde snelheid het energiegebruik per kilometer nauwelijks toeneemt. Wat de grafieken wel laten zien dat bij lage gemiddelde snelheden (<20 km/uur) het gemiddelde energiegebruik hoger is en vooral dat de spreiding in de waardes groter is.

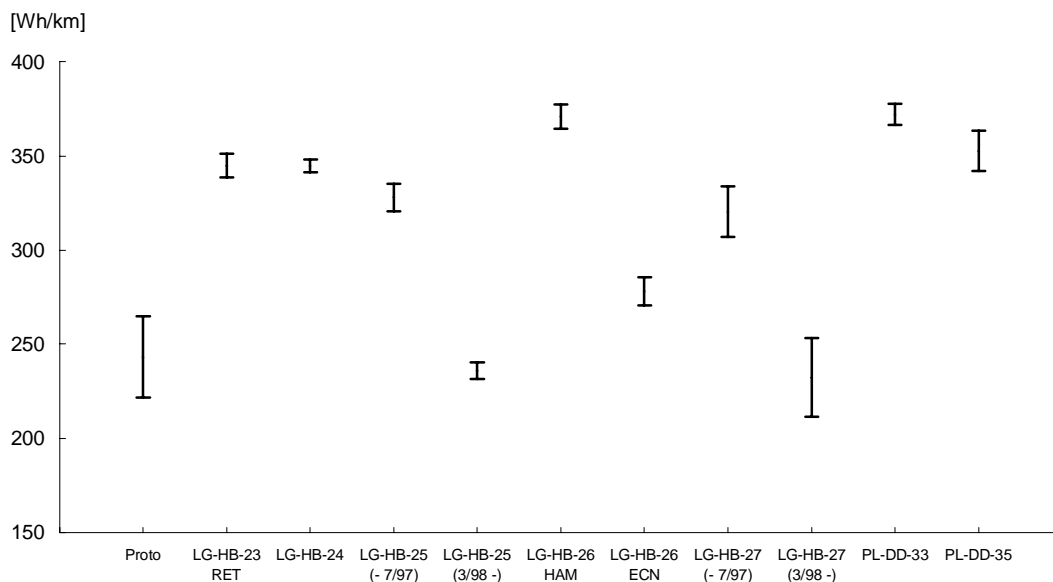
In Figuur 5.7 tot en met Figuur 5.9 is gekozen voor een andere opzet om het energiegebruik in beeld te brengen. Met behulp van alle gemeten gegevens is op basis van een analyse voor drie ritgroepen, 2-10 km, 10-30 km en >30 km een waarde voor het energiegebruik berekend met een 95% zekerheid. Dit wil zeggen dat het energiegebruik voor een rit in de aangegeven categorie met 95% zekerheid binnen de aangegeven waarden zal vallen. Naarmate van een voertuig/rit combinatie meer metingen zijn neemt de onzekerheid af en wordt het verschil tussen de onder en bovenwaarde kleiner. De figuren laten zien dat de onderlinge positie, voor wat het energiegebruik betreft, van de voertuigen ongeveer hetzelfde blijft voor alle de drie ritgroepen.



Figuur 5.7 Energiegebruik per voertuig voor ritlengte >30 km (95% zekerheid)



Figuur 5.8 *Energiegebruik per voertuig voor ritlengte 10-30 km (95% zekerheid)*

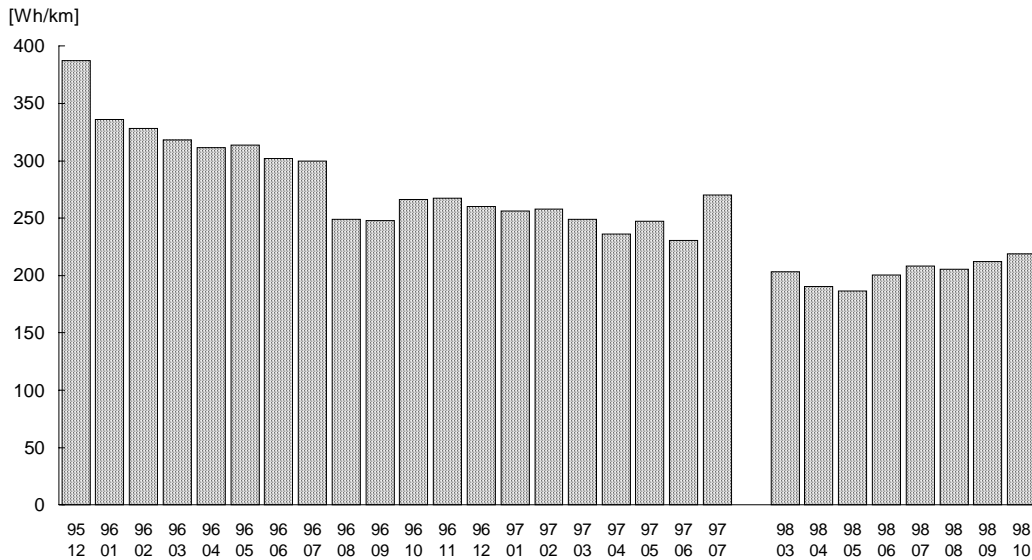


Figuur 5.9 *Energiegebruik per voertuig voor ritlengte 2-10 km (95% zekerheid)*

5.2 Het energiegebruik van LG-HB-27

Zoals eerder aangegeven is het energiegebruik van de elektrische VW Caravelle (LG-HB-27) die bij van der Putten in Lisse heeft gereden in meer dan één opzicht uitzonderlijk. Het energiegebruik heeft gedurende vrijwel de hele periode (van 13/12/95 t/m 22/10/98) een dalende trend vertoond, maar tevens zijn erg lage energiegebruikswaarden gemeten. Zie Figuur 5.10 voor het energiegebruik in de tijd voor de LG-HB-27 voor alle ritten. In de grafiek is het gemiddelde netto energiegebruik weergegeven per maand. Het laagste gemiddelde verbruik voor één maand is 187 Wh/km en viel in de maand mei 1998. De dataregistratie vond plaats op zogenaamde datacassettes die ongeveer 3 weken data konden bevatten. De registratie van één zo'n cassette gaf voor de periode 16 april 1998 tot en met 8 mei 1998 zelf een gemiddeld netto energiegebruik van 184 Wh/km. Voor de LG-HB-27 zal met deze waarde verder worden gerekend voor wat het

finale en primaire energiegebruik. Over de laatste periode van acht maanden, van maart tot en met november 1998, kwam het gemiddelde energiegebruik op 199 Wh/km.



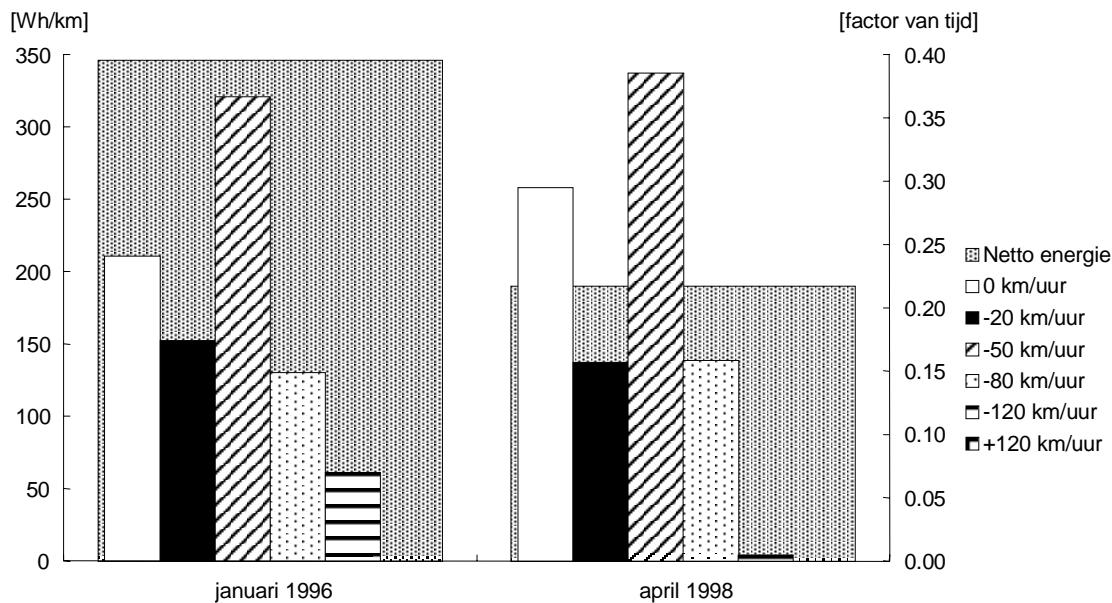
Figuur 5.10 Energiegebruik in de tijd voor de LG-HB-27 (alle ritten)

Wat in de grafiek verder nog opvalt is de plotselinge hogere gebruikswaarde voor de maand juli 1997. Deze piek komt door de afwezigheid van lange ritten in die maand, die per definitie een laag energiegebruik per kilometer hebben. Deze afwezigheid valt samen met de schoolvakanties, wat in dit geval relevant is omdat de elektrische VW Caravelle in deze toepassing voor scholierenvervoer werd ingezet. Overigens is de schoolvakantie en waarschijnlijk een stilstand of in ieder geval een gereduceerd gebruik de oorzaak voor het uitvallen van de dataregistratie. Het verband tussen het niet gebruiken van het voertuig en het uitvallen van de data-acquisitie apparatuur is in Paragraaf 3.1 op blz. 15 aan de orde geweest. Het langzaam oplopen van het energiegebruik in de laatste maanden van 1998 komt waarschijnlijk doordat het regelmatige gebruik van het voertuig afnam in combinatie met het aflopen van het leasecontract in november 1998.

In Figuur 5.12 op blz. 39 is ook een overzicht gegeven van het energiegebruik in de tijd, maar dan alleen voor ritten langer dan 30 km.

Een eenduidige verklaring voor de gestage daling van de energiegebruikswaarden en de uiteindelijk bereikte lage waarden is moeilijk te geven. Een aantal zaken tezamen hebben voor het goede eindresultaat gezorgd. Het rijgedrag en de positieve instelling van de (vaste) chauffeur is zeer waarschijnlijk de belangrijkste factor. De lange tijd dat men bij van der Putten met de elektrische Caravelle heeft gereden is ook belangrijk geweest. Wat uit de verzamelde gegevens valt op te maken is het volgende.

Er wordt bij van der Putten rustig gereden met de Caravelle. Dit rustige rijden uit zich niet zo zeer in een lage gemiddelde snelheid van een rit (inclusief stilstand) of een lage gemiddelde snelheid van het rijden (exclusief stilstand). Beide gemiddelden zijn laag, maar weer niet zo laag dat het een volledige verklaring is voor het lage energiegebruik. Wel is het zo dat de gemiddelde snelheden laag zijn voor een voertuig waar overwegend lange ritten mee wordt gemaakt. Dit geeft wel goed aan dat er rustig met de LG-HB-27 wordt gereden.



Figuur 5.11 *Extremen in energiegebruik en snelheidsverdeling voor LG-HB-27 (ritten >30 km)*

De snelheidsverdeling van de ritten laat verder zien dat het hoge snelheidsgebied vermeden wordt. In Figuur 5.11 is voor zowel een periode waarin een hoog energiegebruik optrad als voor een periode waarin een laag (maar niet het laagste) energiegebruik optrad de snelheidsverdeling als functie van de tijd weergegeven. Het betreft hier de ritten langer dan 30 km, omdat die het meest bepalend waren voor het energiegebruik. In het begin werd er nog wel eens gereden in het snelheidssegment van 80-120 km/uur (7% van de tijd bij ritten langer dan 30 km). Later nam dit percentage af tot minder dan 1%. Voor kortere ritten is een soortgelijke trend zichtbaar naar rustiger rijden. Overigens is de trend dat mensen die met elektrische auto's rijden op den duur rustiger gaan rijden eerder in buitenlandse praktijkproeven waargenomen, zoals bij Electricité de France (EDF) die een grote vloot elektrische voertuigen heeft.

De LG-HB-27 maakt veel korte ritten, maar wat veel opvallender is het aantal ritten van meer dan 30 km. Dit hoge aantal lange ritten komt niet alleen door de lange periode waarover data is verzameld, maar de gemiddelde afstand per rit is met 34 km het hoogst gemeten van alle voertuigen. De gemiddeld lange ritten die bij van der Putten met de elektrische VW Caravelle worden gereden zijn een belangrijke reden voor het lage energiegebruik.

5.3 Het terugwinnen van remenergie en de regeling van de elektromotor

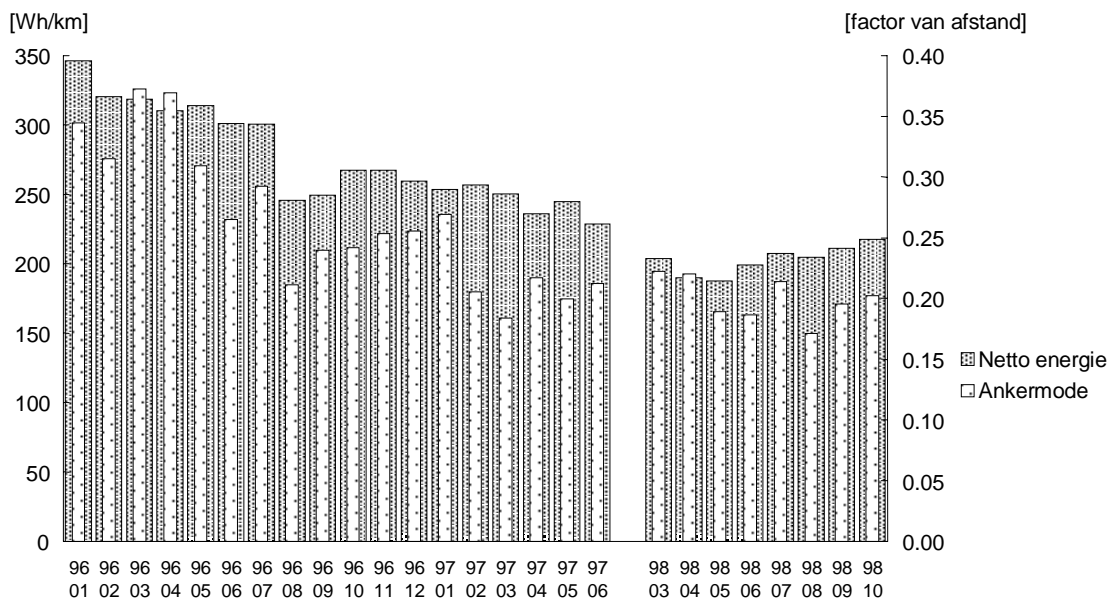
De mogelijkheid tot het terugwinnen van remenergie is een hele belangrijke eigenschap van een elektrisch voertuig. Voor een elektrisch voertuig is het een methode om de actieradius (op één batterijlading) te vergroten. Voor conventionele voertuigen wordt het onderkend als één van de mogelijkheden om een zuiniger voertuig te maken. Om een conventioneel voertuig geschikt te maken zal het omgebouwd moeten worden tot een complexe hybride, waarbij de remenergie ofwel mechanisch (vliegwielen), hydraulisch, elektrochemisch (batterij) of elektrisch in een supercapacitor wordt opgeslagen.

Bij van der Putten wordt een hoog percentage van de remenergie teruggewonnen. Een terugwinpercentage van 14,0% is de op één na hoogste waarde van alle deelnemers (zie Tabel 4.3 op blz. 27). Zo'n hoog terugwinpercentage is des te opmerkelijker omdat er met het voertuig rustig is gereden en er zich dus minder situaties voordeden om remenergie terug te winnen. In de loop der tijd is het terugwinpercentage ook gestegen, wat eens te meer aangeeft dat het leerproces bij een elektrisch voertuig lang door kan gaan. Overigens is het terugwinpercentage maar iets lager

dan bij de LG-HB-24 die bij de Provincie Zuid-Holland heeft gereden, maar daar was het totaal verbruik aanzienlijk hoger, vooral omdat de gemiddelde ritlengte veel lager was.

Een belangrijke factor voor zuinig rijden met een elektrisch voertuig is het op toeren houden van de elektromotor. De elektrische VW Caravelle beschikt net als de conventionele uitvoering (met verbrandingsmotor) over een versnellingsbak. Het kiezen van het juiste moment van schakelen om zuinig met beide type voertuigen te rijden is wezenlijk verschillend. Om bij een benzine- en dieselveertuig zuinig te rijden is het snel (bij een laag motortoerental) schakelen gunstig voor een laag brandstofverbruik. Bij een elektrisch voertuig is het nodig om de elektromotor op toeren te houden, m.a.w. om laat (bij een hoog motortoerental) te schakelen om zuinig te rijden. Dit komt doordat de efficiency van een elektromotor het hoogst is bij hoge toerentallen. Het rijden met hoge toerentallen (laat schakelen) is voor de meeste chauffeurs tegennatuurlijk gezien hun veelal lange ervaring met conventionele voertuigen. Toepassing van een automatische versnellingsbak zou er voor kunnen zorgen dat het energiegebruik minder afhankelijk is van de chauffeur. Nadeel van een conventionele automatische versnellingsbak is het slechtere rendement, wat vooral het gevolg is van verliezen in de (hydraulische) koppelmvormer. Nader onderzoek zal eerst moeten aantonen of het totale energetische effect van toepassing van een automatische versnellingsbak positief is.

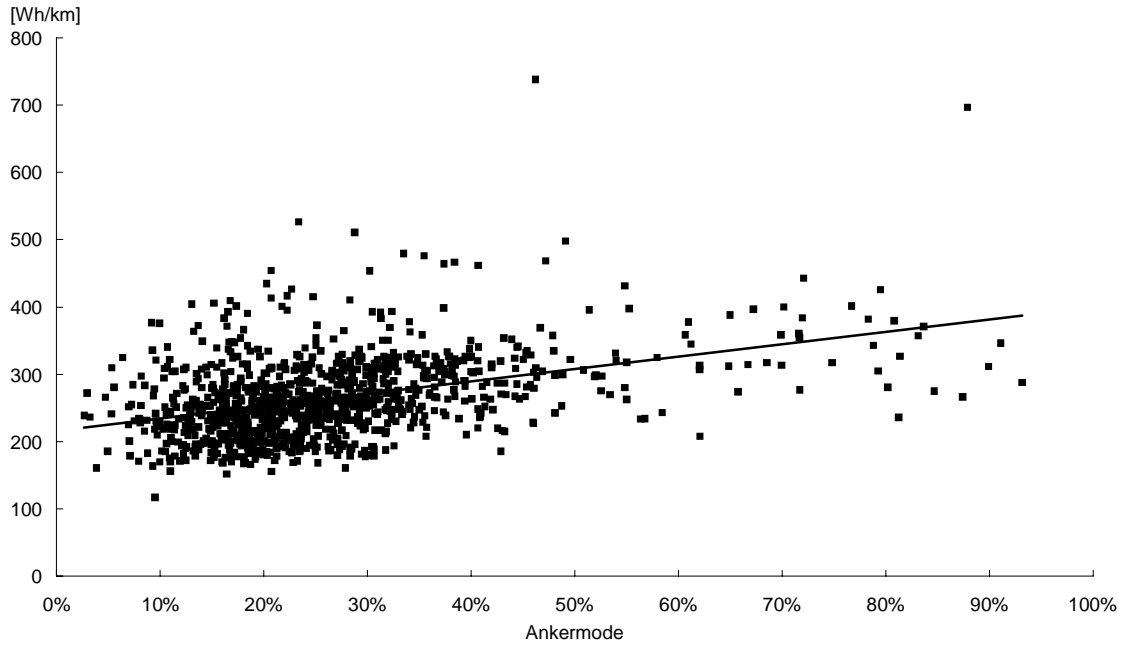
Nu is het zo dat de elektronische regeling van de elektromotor van de VW Caravelle twee regelcondities kent. Bij een laag motortoerental is dit de ankermode (tot 2500 toeren per minuut) en boven de 2500 tpm. de veldmode. Als we de ankermode nemen als maat voor het energiegebruik, dan zal een laag energiegebruik samen moeten gaan met een laag percentage (van de ritafstand) dat in de ankermode is gereden.



Figuur 5.12 *Energiegebruik in de tijd voor de LG-HB-27 (ritten >30 km)*

Het schakelgedrag van de chauffeur is belangrijk om zuinig te rijden. In Figuur 5.12 is het gemiddelde energiegebruik voor de LG-HB-27 per maand over de gehele periode weergegeven voor ritten langer dan 30 km, tezamen met de ankermode (als factor van de afstand). Voor lange ritten waarbij relatief weinig wordt geschakeld is de regelmode van de elektromotor een goede indicatie voor het toerengebied waarin wordt gereden, m.a.w. of veelal in een voor het verbruik gunstigste versnelling wordt gereden. De figuur laat zien dat de relatie tussen ankermode en energiegebruik voor lange afstanden aanwezig is. Voor korte ritten is deze relatie tussen regelmode en energiegebruik minder duidelijk aanwezig, omdat bij korte ritten de acceleratie een belangrijkere factor zal zijn. In Figuur 5.13 is de relatie tussen energiegebruik en de ankermode

(percentage van de afstand) weergegeven voor de LG-HB-27, maar dan voor alle ritten langer dan 0,5 km. Overigens werd er met de LG-HB-27 hoofdzakelijk lange afstanden gereden. Voor het merendeel van de ritten (concentratie van stippen) is het percentage van de ritafstand dat in de ankermode wordt gereden laag, wat overeenkomt met een laag energiegebruik.



Figuur 5.13 *Energiegebruik van de LG-HB-27 als functie van de ankermode (ritten >0,5 km)*

6. VERGELIJKING ENERGIEGEBRUIK 'ELEKTRISCH' EN 'DIESEL'

6.1 Finaal energiegebruik en rendement van de aandrijflijn

Een nauwkeurige berekening van het finaal energiegebruik (uit het stopcontact) is door het ontbreken van laadgegevens niet direct mogelijk. Zoals eerder aangegeven was het registreren van deze gegevens wel gepland, maar uiteindelijk niet mogelijk gebleken. Door het ontbreken van laadgegevens is de van de lader betrokken energie onbekend. Om met de nu beschikbare gegevens het finaal verbruik uit te rekenen is behalve het rendement van de lader ook het laad/ontlaadrendement van de batterij nodig. Dit getal is voor de gegeven praktijksituatie niet bekend, en zou een uitkomst van de meting moeten zijn. Voor de vergelijking van de praktijkgegevens met de rollenbanktest volstaat overigens het energiegebruik uit de accu als centrale parameter.

Resultaten m.b.t. het finaal energiegebruik zouden worden gecorreleerd aan rit- en laadkarakteristieken om inzicht te krijgen in de relatie tussen gebruikspatronen en het energetisch rendement van de gebruikte elektrische aandrijving. Dit rendement zal worden vergeleken met dat van conventionele aandrijflijnen. Van deze oorspronkelijke doelstelling is maar een deel verwezenlijkt. Voor een nadere uitleg van de definiëring van het rendement van een elektrische aandrijflijn zij verwezen naar rapport ECN-C--92-044 (Hilten, 1992).

Het (finaal) elektriciteitsverbruik uit het net kan worden berekend door de tijdens het laden aan de batterij toegevoerde energie te delen door het energetisch rendement van de gebruikte laadapparatuur. Tevens zullen de energieverliezen tijdens het (over)laden moeten worden bepaald.

Om toch beter inzicht te krijgen in het finale energiegebruik zijn een aantal meterstanden geregistreerd van in het ene geval een kilowattuurmeter (kWh) en in het ander geval een ampèr-uurmeter (Ah) door twee deelnemers aan de praktijkproef. De resultaten zijn de volgende:

Voor de LG-HB-24 is over de periode 23-09-1996 t/m 10-03-1998 een finaal energiegebruik (uit het elektriciteitsnet) geregistreerd van 63459 Ah, bij een netspanning van 220 volt komt dit overeen met 13981 kWh. In dezelfde periode is een afstand afgelegd van 17609 km. Het finale energiegebruik voor deze periode kwam op 794 Wh/km.

Voor de LG-HB-27 is over de periode 28-10-1996 t/m 06-05-1997 een finaal energiegebruik (uit het elektriciteitsnet) geregistreerd van 5899 kWh. In dezelfde periode is een afstand afgelegd van 9040 km. Het finale energiegebruik voor deze periode kwam op 653 Wh/km.

Op de relatie tussen finaal energiegebruik en de energiestromen die binnen de elektrische VW Caravelle zijn gemeten wordt in Paragraaf 6.4 op blz. 44 ingegaan.

Bij alle energiebeschouwingen is het brandstofverbruik voor de interieurverwarming niet meegenomen, omdat over het gebruik gedurende de praktijkproef geen gegevens zijn verzameld.

6.2 Laadprocedures en de effecten op rendementen en het energiegebruik

6.2.1 Snelladen versus gewoon laden (nachtladen)

Gewoon, langzaam of nachtladen van de tractiebatterij bestaat uit twee fasen. De eerste fase bestaat uit laden tot 80% van de batterijcapaciteit met een stroom van 36 Ampère (tot 1,6 volt per

cel), daarna laden met constante spanning (1,6 volt) tot de stroom is gedaald tot 9 Ampère. De tweede fase bestaat uit 5 uur naladen met 9 Ampère. Vooral tijdens de tweede fase treedt waterverlies op. Het totale proces van het gewoon laden, ook wel nachtladen genoemd, duurt ongeveer 11 uur. Dit laadproces is zo gekozen dat er sprake is van 25% overladen, wat overeenkomt met het advies van de batterijfabrikant. Gezien de eigenschappen van de batterij zal er altijd sprake moeten zijn van enig overladen, maar of dit zo hoog moet zijn als de opgegeven 25% is niet duidelijk. Voor de volledigheid moet nog vermeld worden dat er ook een derde laadfase bestaat, het waterladen of druppelladen genoemd, waarbij elk half uur gedurende twee minuten met een laadstroom van 2 Ampère wordt geladen. Deze laadfase wordt toegepast als er water bijgevuld moet worden of als het voertuig lange tijd niet gebruikt wordt. Waterladen is een onderhoudsproces om de batterij in een goede conditie te houden.

Snelladen heeft diverse voordelen, maar het grote nadeel is dat de benodigde elektrische infrastructuur vaak niet aanwezig is en vaak alleen tegen hoge kosten aangelegd kan worden. De benodigde elektrische netaansluiting moet een 380 Volt-64 Ampère 3-fasen aansluiting zijn. In principe is snelladen met een laadstroom van 125 A mogelijk, maar in deze praktijkproef is dit niet toegepast. Snelladen lijkt in principe op gewoon laden waarbij de eerste fase met een veel hogere laadstroom plaatsvindt en waarbij de tweede fase (het naladen) niet wordt uitgevoerd. Snelladen kent dus maar één fase, als de celspanning de gemiddelde waarde van 1,6 volt per cel bereikt wordt het snelladen beëindigd. Op dat moment is de batterij voor 80% geladen. In principe zou de tweede fase gewoon uitgevoerd kunnen worden, maar aangezien deze 5 uur duurt, zou dit de beoogde tijdswinst teniet doen. Het is wel zo dat bij veelvuldig gebruik van snelladen het nodig is om ongeveer na elke 10 keer snelladen 1 keer naladen toe te passen.

De voordelen van snelladen liggen niet alleen op het energetische vlak. Het feit dat de tractiebatterij in ongeveer 1 uur tot 80% van zijn capaciteit geladen kan worden heeft vooral operationele waarde. Tijdens het evenement de '12 elektrische uren' van Rotterdam (September 1997) werd door Spijkstaal overtuigend het nut van snelladen aangetoond. De elektrische VW Caravelle werd ingezet voor een demonstratieproef over een lange afstand. Hierbij werd gedurende 6 uur op autowegen rond Rotterdam gereden waarbij de batterij tijdens tussenstops door snelladen werd opgeladen. In totaal werd zo een afstand afgelegd van 300 kilometer! Deze proef toonde aan dat snelladen een mogelijkheid is om met elektrische voertuigen ook grotere afstanden af te leggen.

6.2.2 Rendementen van de batterij

Bij de rollenbankmeting was de werking van de data acquisitie apparatuur vollediger dan in de rest van de praktijkproef daarna. Tijdens de rollenbankmeting is ook gemeten wat er door de lader aan energie in de batterij is gestopt. Voor de hele rollenbankmeting kon zodoende het batterijrendement worden bepaald. Het gemeten batterij (energie) rendement over de hele rollenbankmeting was 60,8%. Nauwkeurigere metingen werden verricht na het rijden van ECE testcycli op de rollenbank, hierbij werden batterij rendementen van 68-70% gemeten, het laden vond in dit geval plaats met een snellader. Bij snelladen is er sprake van minder energieverlies als gevolg van overladen. Het overladen heeft de dissociatie van het gedemineraliseerde water in de batterij tot gevolg, dit is een proces waar veel energie in gaat zitten.

6.2.3 Waterverbruik

De Nikkel-cadmium tractiebatterijen die voor de elektrische VW Caravelle zijn gebruikt hebben de eigenschap dat ze gedurende het naladen (gedemineraliseerd) water verbruiken. Eigenlijk is de term water verbruiken niet helemaal correct. Beter is het om te zeggen dat tijdens het naladen water gedissocieerd wordt. Dissociatie van water is een proces dat vergelijkbaar is met het verkoken van water maar wat bij een veel lagere temperatuur plaatsvindt. Voor de dissociatie van

water is energie nodig. Naladen met 3 Ah geeft een verbruik van 1 cc per cel van de batterij. De tractie batterij heeft 160 cellen.

Er is sprake van naladen als de laadstroom tot circa 9 ampère is gedaald. Het naladen met 9 ampère vindt plaats gedurende 5 uur. Nominaal geeft 5 uur naladen met 9 ampère een waterverbruik van $5 \times 9/3 = 15$ cc per cel. Vermenigvuldigt met 160 cellen geeft dit voor de hele tractiebatterij een waterverbruik van 2,4 liter per nalading. De batterij heeft per cel een maximale waterreserve van 165 cc per cel. Voor de hele batterij bedraagt de waterreserve $160 \times 0,165 = 26,4$ liter. Het regelmatig bijvullen van water voor de batterij is noodzakelijk gezien de beperkte reserve en het hoge waterverbruik tijdens naladen. Het advies is daarom om na 10 keer gewoon laden (nachtladen) het water bij te vullen. Het bijvullen dient één uur na het beëindigen van het laden te geschieden. Als dit niet mogelijk is kan het tijdstip van water bijvullen enkele uren worden uitgesteld, door na het nachtladen op het zogenaamde waterladen over te schakelen. In de praktijk werd het proces om water bij te vullen als niet gebruikersvriendelijk ervaren.

De energie die benodigd is om water te dissociëren is als volgt te berekenen. Eén uur naladen met 9 Ampère geeft een waterverbruik van 0,48 liter/uur. De batterijspanning van 192 Volt vermenigvuldigt met 9 Ah komt overeen met 1728 Wh. Dit is de energie benodigd om 0,48 liter water te dissociëren. Hieruit volgt de dissociatie energie van 3600 Wh per liter water.

Voor de periodes waar voor de LG-HB-24 en LG-HB-27 het elektriciteitsverbruik uit het net is bijgehouden is ook bijgehouden hoeveel water voor de tractiebatterij moest worden bijgevuld.

Voor de LG-HB-24 is over de periode 23-09-1996 t/m 10-03-1998 een waterverbruik geregistreerd van 735 liter. In dezelfde periode is een afstand afgelegd van 17609 km. Het waterverbruik voor deze periode kwam op 4,2 liter/100km.

Voor de LG-HB-27 is over de periode 28-10-1996 t/m 06-05-1997 een waterverbruik geregistreerd van 289 liter. In dezelfde periode is een afstand afgelegd van 9040 km. Het waterverbruik voor deze periode kwam op 3,2 liter/100km.

6.3 Primair energiegebruik

M.b.v. gegevens over elektriciteitsopwekking in Nederland wordt uit het finale elektriciteitsverbruik (uit het elektriciteitsnet) het primair energiegebruik berekend van de elektrische VW Cavalle.

Voor de inschatting van primair energiegebruik en indirecte emissies van elektrische voertuigen kunnen verschillende methoden worden gehanteerd. Een veel toegepaste methode gaat uit van het gemiddeld rendement en de gemiddelde emissies per kWh van het totale opwekkingspark (in dit geval in Nederland). Voordeel van deze methode is, naast zijn eenvoud, dat bij algemene vergelijkingen tussen elektrische en conventionele voertuigen geen informatie benodigd is over het tijdstip waarop de elektrische voertuigen hun accu's bijladen. Aangezien de oorspronkelijke doelstelling van het project om de laadtijdstippen en periodes te registreren niet gehaald is, is dit ook de meeste reële methode om naar het primaire energiegebruik te kijken. Vooral wanneer gerekend wordt aan een toekomstscenario met grootschalige marktpenetratie van elektrische voertuigen is het moeilijk om uitspraken te doen over laadgedrag. In ieder geval is het in zulke gevallen gevaarlijk om aan te nemen dat alle elektriciteit in de daluren wordt geladen. Nadeel van de methode is bijgevolg dat de mogelijke voordelen (bijv. t.a.v. een overall rendementsverbetering), die kunnen worden behaald bij een 'verstandige' inzet van elektrische voertuigen, worden onderschat.

Er is nog een reden waarom de methode van gemiddeld opwekkrendement conservatief is. In 1997 was het gemiddeld opwekkrendement van alle geproduceerde elektriciteit in Nederland

44%. De nieuwste elektriciteitscentrale die dat jaar in gebruik genomen werd, de Eemscentrale, heeft een maximaal rendement van 54%. Dit geeft aan dat het gemiddeld opwekrendement in de toekomst, als meer oude centrales worden vervangen, nog flink zal stijgen. Bij dit alles moet men wel bedenken dat een maximale efficiency van een centrale alleen gehaald wordt bij een volledige benutting van de capaciteit. Aangezien op dit moment de variatie in elektriciteitsvraag nogal groot is, zal het maximale rendement niet gehaald worden. Load management is een methode om het energiegebruik in de tijd constant te houden (load levelling) waardoor de centrales veel dichter bij hun optimum efficiency kunnen worden gehouden. Load management is het centraal (bij)sturen van de elektriciteitsvraag. Het laden van veel elektrische voertuigen zou een belangrijke rol kunnen spelen in deze ontwikkeling.

Een andere belangrijke methode voor het bepalen van het primaire energiegebruik gaat niet uit van gemiddelden, maar berekent het momentane- of marginaalverbruik van primaire energiedragers en de momentane emissies, welke moeten worden toegerekend aan de t.b.v. elektrische auto's extra geproduceerde elektriciteit. Bij de berekening van milieueffecten in toekomstscenari'o's, waarbij zeer waarschijnlijk niet alleen elektrische auto's maar ook de invoering van andere nieuwe technologieën voor een toename van de elektriciteitsvraag zorgen, heeft deze methode het bezwaar dat er arbitraire keuzes moeten worden gemaakt in de toedeling van 'schone' en 'minder schone' kW uren aan verschillende nieuwe technologieën.

Oorspronkelijk zou het in dit onderzoek ook gaan om de inschatting van energie- en milieueffecten van concrete voertuigen in concrete vervoerssituaties, waarvan uit de met het registratiesysteem vastgelegde meetgegevens goed bekend zou zijn wanneer de gebruikte elektriciteit uit het net was geladen. In dat geval zou het zinvol om, naast de methode met gemiddelde rendementen en emissies, ook de methode met marginaal verbruik en marginale emissies toe te passen. Een onderlinge vergelijking zou gemaakt kunnen worden van de op deze manier voor verschillende voertuigen met een verschillend laadpatroon (in termen van hoeveelheid en verhouding dag/nachtladen) berekende marginale effecten met de resultaten van de methode met gemiddelde emissies. Dit zou een goed inzicht geven in de spreiding welke voor de toekomst zou mogen worden verwacht in de energie- en milieueffecten van elektrische voertuigen in afhankelijkheid van de wijze van gebruik. Hieruit zouden beleidsrelevante aanbevelingen kunnen worden gederiveerd die zouden kunnen bijdragen aan een minimalisering van negatieve effecten en maximalisering van positieve effecten, wanneer elektrische voertuigen op grotere schaal worden ingezet.

Het was de bedoeling om samen te werken met de Sep om berekeningen te doen aan het momentane verbruik van primaire energiedragers. De Sep beschikt over een systeemsimulatiemodel, waarmee het toekomstige elektriciteitsopwekkingpark en de momentane inzet van verschillende opwekkingseenheden kan worden gesimuleerd om te voldoen aan een op uurbasis gedefinieerd elektriciteits-vraagpatroon. Om dit soort berekeningen te kunnen doen is het nodig om gegevens over het laden te registreren, zoals tijdstip van laden en laadduur. Helaas leverde de registratie hiervan zoveel technische problemen op dat uiteindelijk besloten moest worden om dit onderdeel van het meetprogramma niet uit te voeren.

De Sep heeft in het verleden wel studie gedaan naar de energie- en milieuaspecten van elektrische voertuigen (Sep, 1994).

Als referentie zullen de resultaten worden vergeleken met gegevens omtrent energiegebruik van conventionele voertuigen.

6.4 Primair energiegebruik van de LG-HB-27

De meest opmerkelijke gebruiker is van der Putten uit Lisse (LG-HB-27) met in één periode, van 16/4/98 t/m 8/5/98 een ongekend laag energiegebruik van 184 Wh/km. Ter vergelijking, de

gebruikswaarde van de rollenbank meting was 216 Wh/km. Deze gebruiker heeft vanaf het begin (december 1995) meegedaan en is diegene die de grootste afstand, meer dan 58.000 kilometer, met de elektrische VW Caravelle heeft afgelegd. Voordat in de praktijk deze lage energiegebruikswaardes werden gerealiseerd, is een lange periode van geleidelijke daling vooraf gegaan. Twee andere gebruikers zijn overigens ook dicht bij de energiegebruikswaardes van de rollenbank meting uitgekomen.

Bij deze eerste resultaten is wel uitgegaan van een optimale situatie. Er is in beide gevallen geen rekening gehouden met de energetische verliezen van het laadproces van de batterijen. Zelfs als er sprake is van een optimaal laadproces zijn er nog verliezen. Bij de vertaling van de metingen op de rollenbank en de metingen bij van der Putten naar primair energiegebruik is uitgegaan van het netto energiegebruik aan boord van het voertuig tezamen met theoretische (minimale) verliezen bij het laden van de batterij en gemiddelde waardes voor de opwekking en transport van de elektriciteit. Dit theoretische primaire energiegebruik zal worden vergeleken met waardes die in de praktijk daadwerkelijk zijn gemeten.

Voor de opwekking en het transport van de elektriciteit zijn gemiddelde waardes genomen voor het gehele elektriciteitsnet in Nederland voor het jaar 1997. Het gemiddelde opwekkendement van alle centrales was in dat jaar gemiddeld 44%. De net verliezen (distributie) waren ongeveer 4,5%.

De KEMA heeft het (energie) rendement van zowel de lader als de tractiebatterij van de elektrische VW Caravelle bepaald uit metingen (Gerwen, 1996). De uitkomst van het onderzoek, waarbij sprake was van normaal (langzaam) laden, was een energierendement van 93 à 94% voor de lader en 64 à 67% voor de batterij. Het cyclus rendement van de lader en batterij tezamen kwam op 61% uit. Eén cyclus is het volledige ontladen en weer laden van de batterij. Met deze rendementen zijn de berekeningen van het primaire energiegebruik uitgevoerd.

Uit het theoretische (minimum) verbruik op basis van netto energiestromen uit de batterij en de volgende rendementen is het primaire energiegebruik te berekenen:

- elektriciteitsopwekking 44 % (Nederland 1994)
- distributie 95,5% (Nederland 1994)
- lader 94 % (Gerwen,1996)
- batterij 64 % (Gerwen,1996)

Voor de LG-HB-27 is over de periode van 16/4/98 t/m 8/5/98 het gemiddeld netto energiegebruik (in het voertuig) 184 Wh/km geweest, wat overeenkomt met 2,7 MJ/km primair (theoretisch), bij eerder genoemde rendementen. Deze waarde is de laagste die gemeten is gedurende de hele praktijkproef. Deze lage waarde lag iets onder een waarde die over een veel langere periode is gemeten. Over de periode van 06/03/98 t/m 22/10/98 is het gemiddeld netto energiegebruik (in het voertuig) 199 Wh/km geweest, wat overeenkomt met 3,0 MJ/km primair (theoretisch).

Voor een VW Caravelle diesel, die 1 liter op de 10 km verbruikt, is het finale energiegebruik 3,6 MJ/km. Het primaire energiegebruik is 4,1 MJ/km, als met 12% verliezen in winning, transport, raffinage en distributie rekening wordt gehouden. Een primair energiegebruik van 4,1 MJ/km komt overeen met een elektrisch verbruik van 275 Wh/km. Dit mag een elektrisch voertuig verbruiken voordat het onzuiniger is dan een diesel voertuig die 1 liter per 10 km verbruikt.

Volgens de theoretische beschouwing zou de elektrische VW Caravelle zuiniger zijn dan de dieseltetheranger. Echter het laadproces van de tractiebatterij geeft op dit moment in de praktijk nog aanzienlijke verliezen. Er is ook sprake van een additioneel verlies omdat de boordaccu ook bijgeladen wordt gedurende het laden van de tractiebatterij. Deze theoretische waardes zijn te vertalen naar wat er in werkelijkheid verbruikt zou kunnen worden, maar het is beter om het theoretische energiegebruik te vergelijken met werkelijke metingen. Deze werkelijke metingen

zijn metingen van het finale energiegebruik uit het elektriciteitsnet. De periode waarover het finale energiegebruik werkelijk is gemeten komt niet overeen met de periodes waarover voor de LG-HB-27 waardes onder de 200 Wh/km zijn geregistreerd.

In Paragraaf 6.1 op blz. 41 is aangegeven dat voor de LG-HB-27 over de periode 28-10-1996 t/m 06-05-1997 een gemiddeld finaal energiegebruik (uit het elektriciteitsnet) is geregistreerd van 653 Wh/km, wat overeen komt met 5,9 MJ/km primair. Het finale energiegebruik moet door de rendementen van elektriciteitsopwekking en distributie gedeeld worden om op het primaire energiegebruik uit te komen. Voor dezelfde periode kwam het netto energiegebruik in het voertuig uit op 255 Wh/km. Laten we op dit laatste getal alle eerder genoemde rendementen los (inclusief lader en batterij) om tot het primaire energiegebruik te komen, dan geeft dit een energiegebruik van 3,8 MJ/km.

Het reële verbruik (uit het elektriciteitsnet) minus het theoretische verbruik (in het voertuig) geeft aan hoeveel energie verloren gaat door het overladen van de batterij inclusief de verliezen door de dissociatie van (batterij) water. Bij de LG-HB-27 zijn de totale verliezen in het laadproces 55%, voor de periode waarover het energiegebruik uit het net beschikbaar is. Deze verliezen komen bovenop de lader en batterij verliezen.

Gedurende de periode waarover de metingen van energiegebruik uit het net werden gemeten is het feitelijke primaire energiegebruik van de elektrische VW Caravelle hoger uitgekomen dan voor de conventionele diesel versie. Ook als we uitgaan van de meest zuinige periode, met een energiegebruik van 184 Wh/km, dan komt het primaire verbruik van de elektrische versie net iets hoger uit dan dat voor de diesel versie.

Een groot deel van de verliezen komt voor rekening van de dissociatie van water in de batterij. De gekozen Nikkel-cadmium batterij heeft de eigenschap dat in combinatie met de voorgeschreven laadprocedure er dissociatie van water plaatsvindt. Waarom de batterijfabrikant deze laadprocedure heeft voorgeschreven is niet bekend. De relatie tussen overladen van de batterij en de dissociatie van water is onduidelijk. Het waterverbruik over dezelfde periode waarin ook de energiegebruikmetingen uit het net waren gedaan kwam uit op 3,2 liter per 100 kilometer zie Paragraaf 6.2.3 op blz. 42. Dit waterverbruik laat zich vertalen naar een dissociatie energie die gelijk is aan 115 Wh/km. Zonder de dissociatie van het water zou het energiegebruik uit het net $653 - 115 = 537$ Wh/km zijn wat overeenkomt met 4,8 MJ/km.

Een deel van de totale verliezen is te verklaren door het waterverbruik, wat overblijft is het verlies door overladen. De verliezen door het overladen van de batterij zijn 26%. Dit percentage komt goed overeen met de waarde die de fabrikant van de batterij opgeeft als een gewenst percentage voor overladen. Saft, de fabrikant van de batterij, adviseert een laadmethode met een laadfactor van 1,25. Dit betekent dat er 25% meer wordt geladen dan er van tevoren is onttrokken. Het gewone laadproces van de elektrische VW Caravelle heeft een laadfactor van 1,25. Dat de batterijfabrikant het overladen van de batterij aanbeveelt is omdat deze er zeker van wil zijn dat de batterij volledig geladen wordt en zijn nominale prestaties haalt. Voor de batterijfabrikant is het feit dat de batterij zijn specificaties haalt belangrijker dan een eventueel laag energiegebruik uit het net. Vanuit de optiek van de batterijfabrikant is het nut van overladen wel in te zien, maar of het zinvol is voor de batterij om water te dissociëren is onduidelijk. Ook hieruit blijkt dat er in het hele laadproces van de batterij op meerdere onderdelen verbetering mogelijk is maar dat hiervoor nader onderzoek nodig zal zijn.

Snelladen is een mogelijkheid om de laadverliezen te beperken, vooral omdat de tweede laadfase (het naladen) waarbij de dissociatie van water plaatsvindt, niet toegepast wordt om de totale laadtijd kort te houden.

Er zijn dus mogelijkheden voor de elektrische VW Caravelle om zuiniger te worden dan de diesel versie, maar dan zal er vooral iets aan de laadverliezen gedaan moeten worden.

6.5 Primair energiegebruik van de LG-HB-24

Net als voor de LG-HB-27 is ook voor de LG-HB-24 gedurende enige tijd het energiegebruik uit het net en het waterverbruik bijgehouden, zie ook de Paragrafen 6.1 op blz. 41 en 6.4 op blz. 44 Over de periode van 23/09/96 t/m 10/03/98 is het gemiddeld netto energiegebruik (in het voertuig) 345 Wh/km geweest, wat overeenkomt met 5,1 MJ/km primair.

In Paragraaf 6.1 op blz. 41 is aangegeven dat voor de LG-HB-24 over de periode van 23/09/96 t/m 10/03/98 een gemiddeld finaal energiegebruik (uit het elektriciteitsnet) is geregistreerd van 794 Wh/km, wat overeen komt met 7,1 MJ/km primair. Voor dezelfde periode kwam het netto energiegebruik in het voertuig uit op 345 Wh/km, wat overeenkomt met een energiegebruik van 5,1 MJ/km.

Het reële verbruik (uit het elektriciteitsnet) minus het theoretische verbruik (in het voertuig) geeft aan hoeveel energie verloren gaat door het overladen van de batterij inclusief de verliezen door de dissociatie van (batterij) water. Bij de LG-HB-24 zijn de totale verliezen in het laadproces 39%, voor de periode waarover het energiegebruik uit het net beschikbaar is. Een factor die ook invloed heeft op de laadverliezen is de ladingstoestand van de batterij aan het begin van het laadproces. Bij een batterij die nog 70% van zijn lading heeft is de eerste (efficiënte) laadfase erg kort in verhouding tot het naladen waarbij veel verliezen optreden door de dissociatie van water. Deze situatie geeft een slecht totaalrendement. Bij een batterij die nog maar 20% van zijn lading heeft is de eerste laadfase lang in verhouding tot het naladen, wat een goed rendement zou moeten geven. De ladingstoestand van de batterij bij het begin van het laadproces is onbekend. Uit het gemiddelde energiegebruik per kilometer en de gemiddeld gereden kilometers per dag is wel voor de hele meetperiode te berekenen wat het gemiddelde energiegebruik per dag uit de batterij is. Voor de LG-HB-24 die weinig kilometers reed bij een hoog energiegebruik is het gemiddelde energiegebruik per dag uit de batterij lager dan voor de LG-HB-27 waar veel maar zuinig mee is gereden. De LG-HB-24 zou op grond van deze situatie hogere laadverliezen moeten geven, wat in de praktijk niet het geval blijkt te zijn. Een verklaring voor het feit dat de totale laadverliezen kleiner zijn dan voor de LG-HB-27 is niet te geven.

Het waterverbruik over dezelfde periode waar ook de energiegebruikmetingen uit het net waren gedaan kwam uit op 4,2 liter per 100 kilometer. Dit waterverbruik laat zich vertalen naar een dissociatie energie die gelijk is aan 150 Wh/km. Zonder de dissociatie van het water zou het energiegebruik uit het net $794 - 150 = 644$ Wh/km zijn wat overeenkomt met 5,8 MJ/km. De verliezen door het overladen van de batterij komen uit op 14%. Dit percentage is lager dan de 25% die de fabrikant van de batterij opgeeft als een gewenst percentage voor overladen. Vergeleken met de LG-HB-27 is er meer water verbruikt per kilometer, terwijl de totale laadverliezen lager zijn. Helaas is hiervoor geen verklaring te geven.

7. CONCLUSIES

De data-acquisitie systemen aan boord van de voertuigen heeft voor veel problemen gezorgd die ook de betrouwbaarheid van de voertuigen verminderde. De problemen resulteerden ook in het niet functioneren van de dataregistratie apparatuur zelf. Dit is één van de oorzaken dat er regelmatig bij alle voertuigen periodes zijn waar geen data registratie plaats gevonden heeft. Een ander probleem met de data-acquisitie resulteerde in het niet kunnen uitvoeren van de metingen over het laadgedrag, laadenergie en type lader. Dit heeft in een aanzienlijk gemis aan data geresulteerd, die voor de bepaling van het energiegebruik eigenlijk onmisbaar waren. Schattingen hebben nu de plaats van metingen ingenomen.

Volgens de theoretische beschouwing zou de elektrische VW Caravelle veel zuiniger zijn dan de diesel tegenhanger. De eerste metingen in de praktijk gaven echter een veel hoger energiegebruik dan op grond van de op de rollenbank gemeten waarden mocht worden verwacht. Bij het verdere verloop van de praktijkproef bleek al snel dat het energiegebruik in de tijd een dalende trend vertoonde. Vooral bij de LG-HB-27 (van der Putten in Lisse) heeft de dalende trend zich vrijwel tot het eind doorgezet. De lage waardes die uiteindelijk bereikt werden waren zelfs lager dan het gebruik gemeten tijdens de rollenbankmeting.

Gedurende de periode waarover de metingen van energiegebruik uit het net werden gemeten is het feitelijke primaire energiegebruik van de elektrische VW Caravelle (LG-HB-27) hoger uitgekomen dan voor de conventionele diesel versie. De belangrijkste reden hiervoor is het feit dat de totale verliezen in het laadproces zo hoog zijn (55%). Ook als we uitgaan van het energiegebruik van het zuinigste voertuig in de periode met het laagste energiegebruik (184 Wh/km), dan komt het primaire verbruik van de elektrische versie net iets hoger uit dan dat voor de diesel versie. Hierbij zijn we onder meer uitgegaan van het gemiddelde elektriciteitsopwekrendement in Nederland van 44% (1996). Er zijn mogelijkheden voor de elektrische VW Caravelle om zuiniger te worden dan de diesel versie, maar dan zal er vooral iets aan de laadverliezen gedaan moeten worden.

Het door de batterijfabrikant voorgeschreven laadproces van de tractiebatterij geeft op dit moment in de praktijk aanzienlijke verliezen. Een groot deel van de verliezen komt voor rekening van de dissociatie van water in de batterij. Hieruit blijkt dat er in het hele laadproces van de batterij op meerdere onderdelen verbetering mogelijk is, maar dat hiervoor nader onderzoek nodig zal zijn. Snelladen is een mogelijkheid om de laadverliezen te beperken, vooral omdat de tweede laadfase (het naladen) waarbij de dissociatie van water plaatsvindt, dan niet toegepast wordt om de totale laadtijd kort te houden.

Om de verschillen in energiegebruik van de verschillende deelnemers te verklaren is uitvoerig naar verklaringen gezocht. Het is opvallende dat er geen direct verband lijkt te zijn tussen gemiddelde snelheden en het energiegebruik. De meest waarschijnlijke verklaring is dat het een gevolg is van de elektromotorkarakteristiek. Een elektromotor is namelijk het meest efficiënt bij hoge toerentallen. De lengte van de ritten kan heel bepalend zijn voor het energiegebruik van een voertuig. De meeste voertuigen volgen de wetmatigheid dat naarmate de rit langer is het energiegebruik per km afneemt. Wel is het zo dat het effect afneemt naarmate de ritlengte toeneemt. De mogelijkheid tot het terugwinnen van remenergie is een belangrijke eigenschap van een elektrisch voertuig. Voor een elektrisch voertuig is het een methode om de actieradius (op één batterijlading) te vergroten. Energie terugwinpercentages van 5,9% tot 15,9% zijn gemeten.

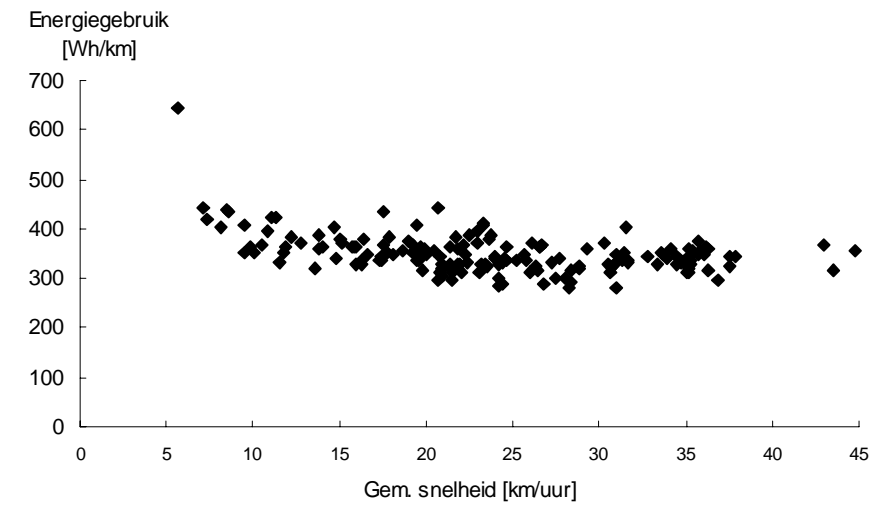
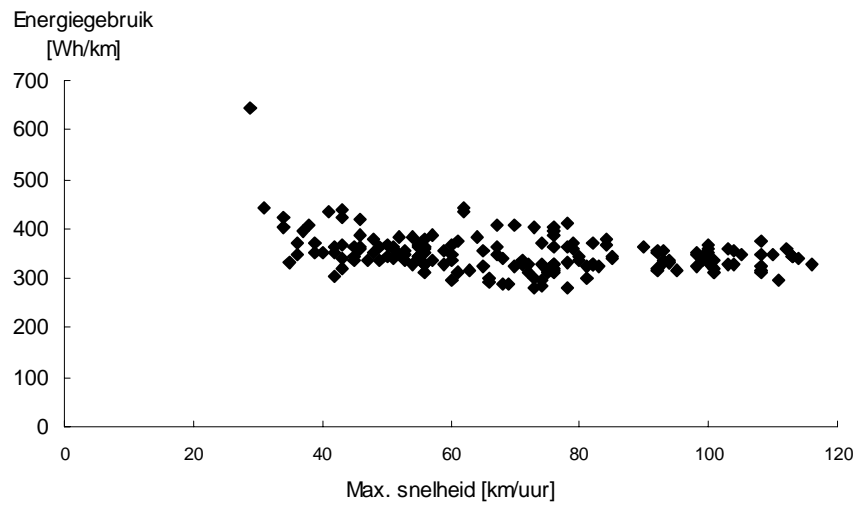
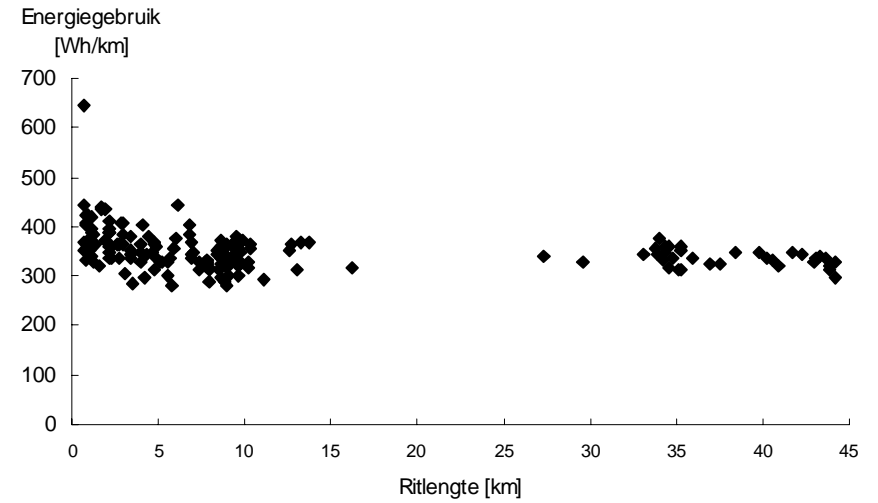
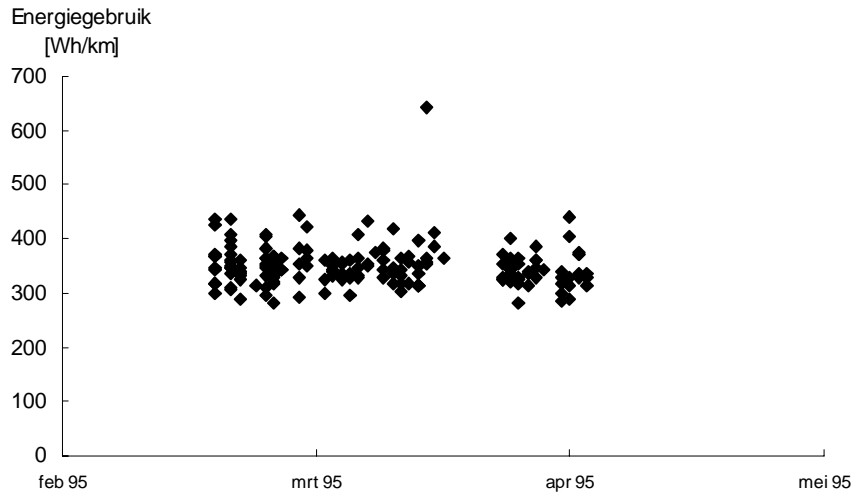
Er zijn in de praktijkproef verschillende zaken naar boven gekomen die een nader onderzoek rechtvaardigen. Het laadproces en de optredende verliezen spelen een cruciale rol bij elektrische voertuigen. Gezien de uitkomsten van de praktijkproef is nader onderzoek gewenst. Toepassing

van een automatische versnellingsbak zou er voor kunnen zorgen dat het energiegebruik minder afhankelijk is van de chauffeur. Nadeel van een conventionele automatische versnellingsbak is het slechtere rendement. Nader onderzoek zal eerst moeten aantonen of het totale energetische effect van toepassing van een automatische versnellingsbak positief is.

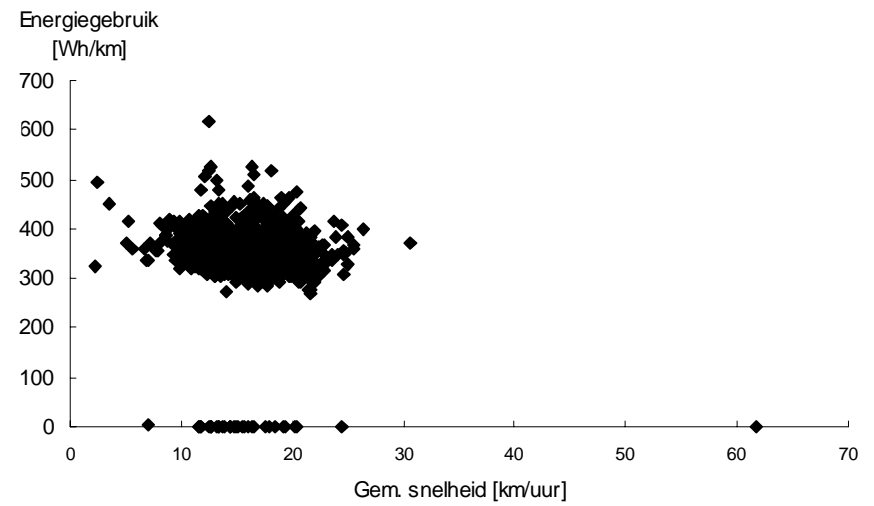
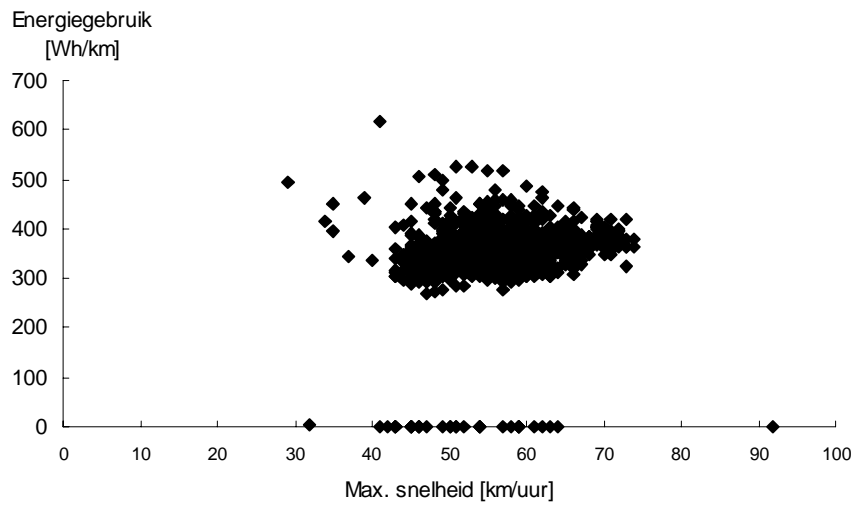
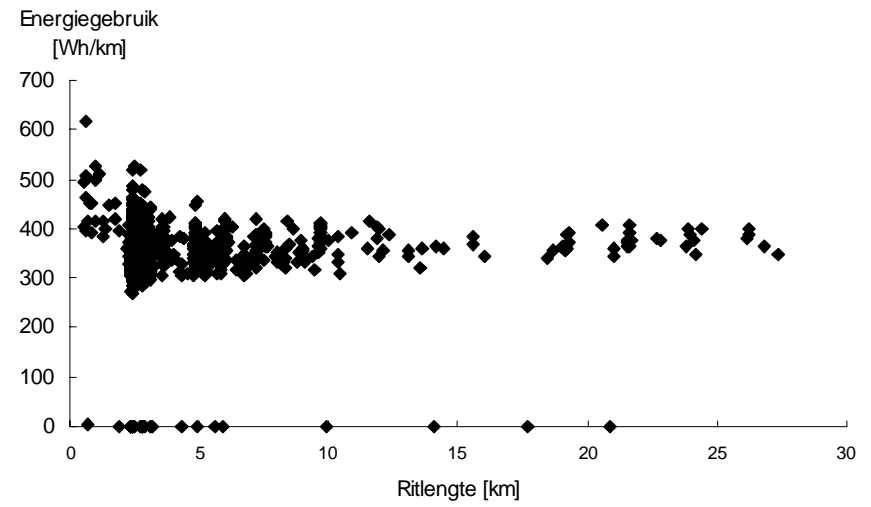
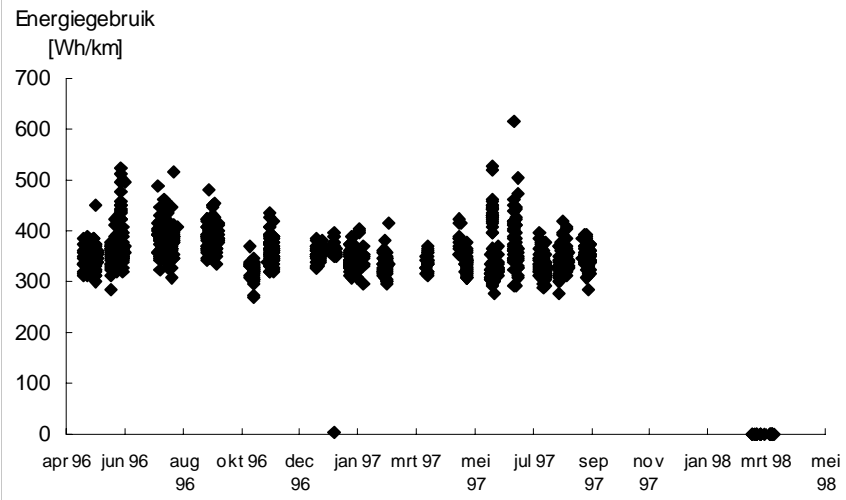
REFERENTIES

- Gerwen, R.J.F. van: *Rendementsmetingen aan een laadapparaat voor een elektrische VW Caravelle*, 41971-IES 96-1103, Kema, Arnhem, 9 september 1996.
- Hilten, O. van: *Meetprogramma praktijkproef elektrische voertuigen*. ECN-C--92-044, ECN, Petten, juli 1992.
- Kist, W., R. Vermeulen: *Het aandrijfrendement en het energieverbruik van de VW Caravelle 2,5 TDI*, HTS-Autotechniek, Arnhem, 1998.
- NEA: *Evaluatie exploitatie electrocar*, 966414\13303, NEA, februari 1997.
- Schillemans, R.A.A., C.J.T. van de Weijer, C.E. Kluiters: *Bouw en beproeving van een VW Spijkstaal Caravelle met nikkel-cadmium batterij*, TNO-MW-R 95/137, TNO, Delft, 7 september 1995.
- Sep, N.V. Samenwerkende elektriciteits-productiebedrijven: *Energie- en milieu-aspecten van elektrische voertuigen*, PO/EMT 94-172, Sep, 10 juni 1994.
- Smokers, R.T.M., O. van Hilten: *Elektrische auto's in het perspectief van de milieu- en energieproblematiek*, ECN-RX--92-073, ECN, Petten, december 1992.

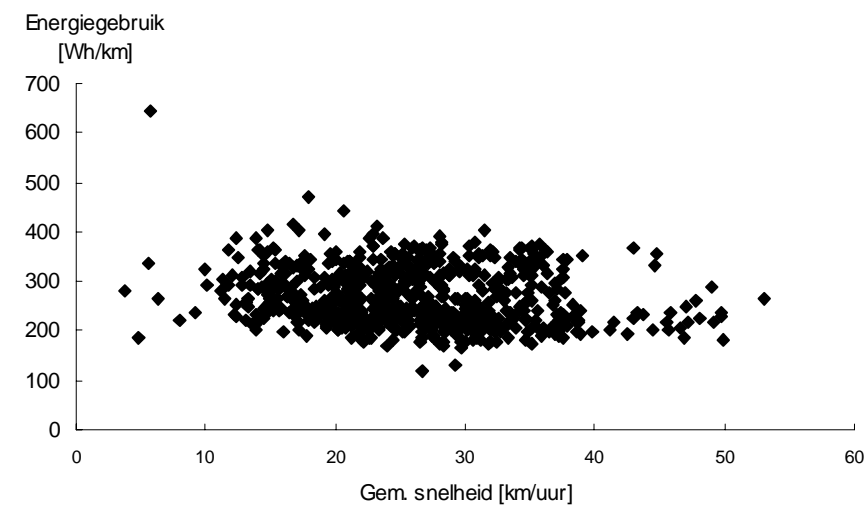
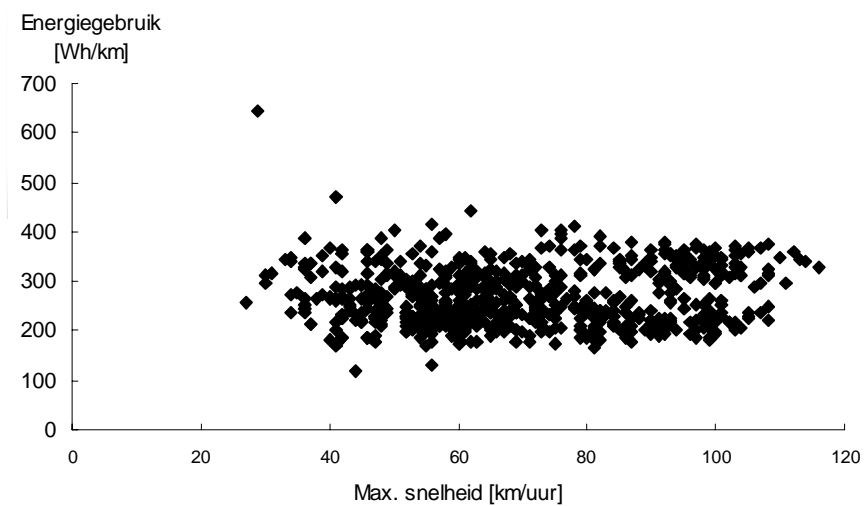
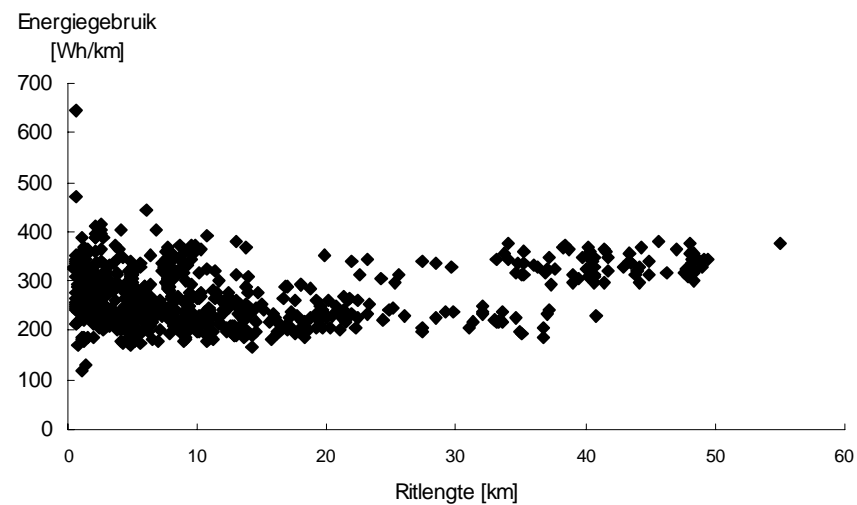
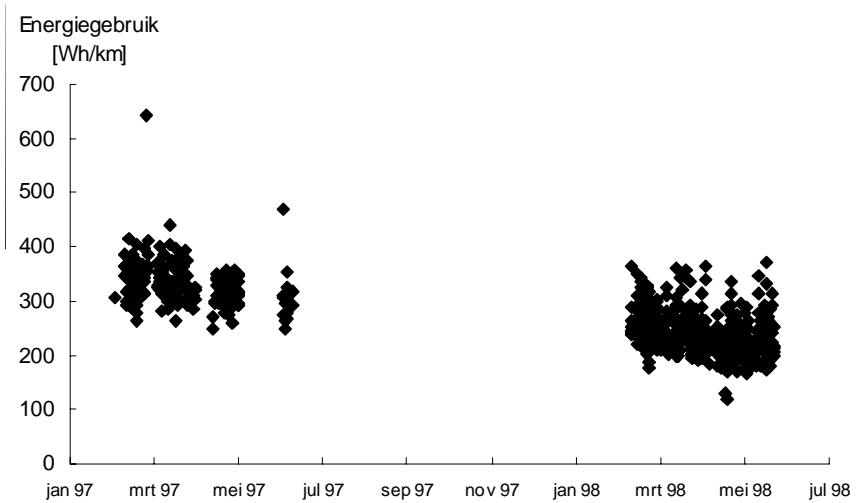
BIJLAGE: GRAFIEKEN OVERZICHT PER VOERTUIG



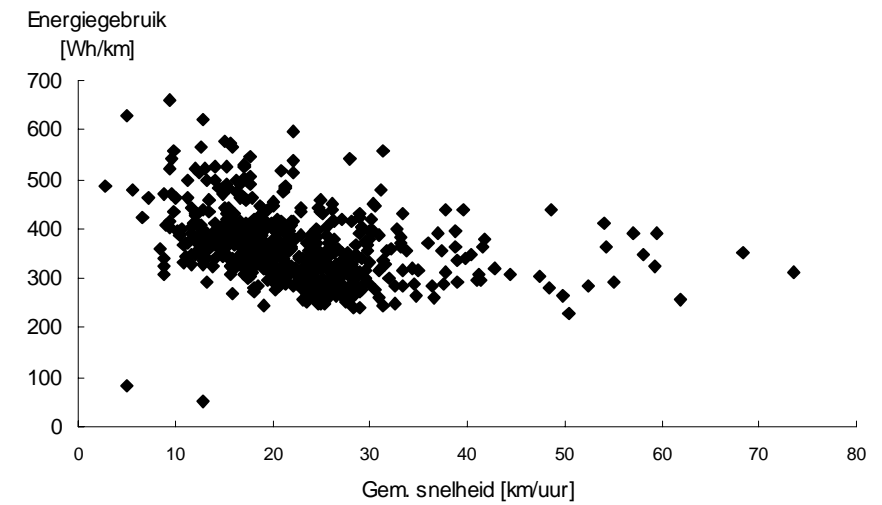
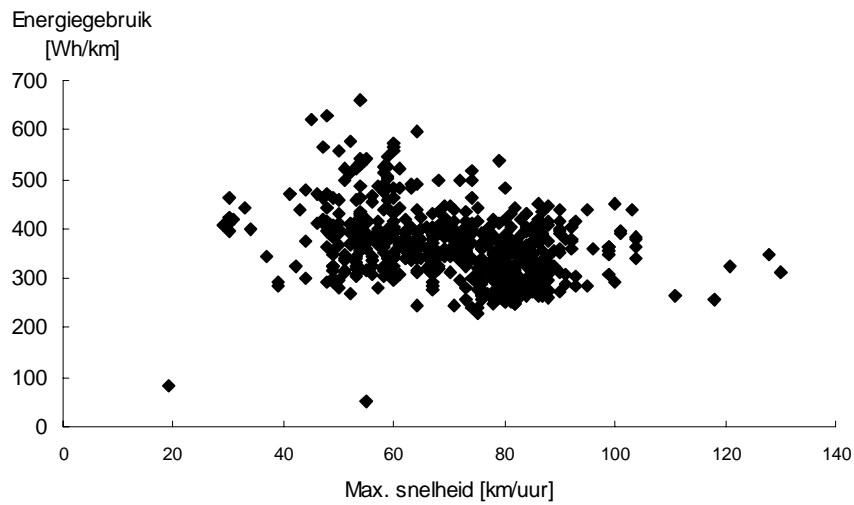
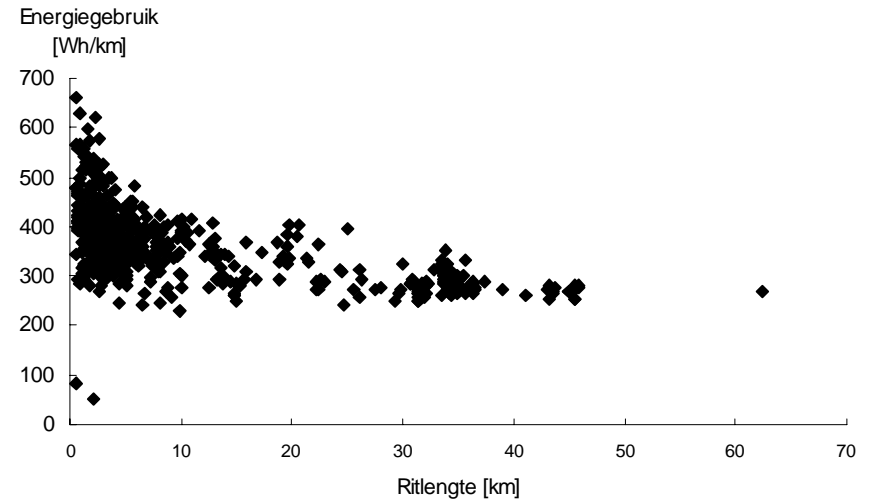
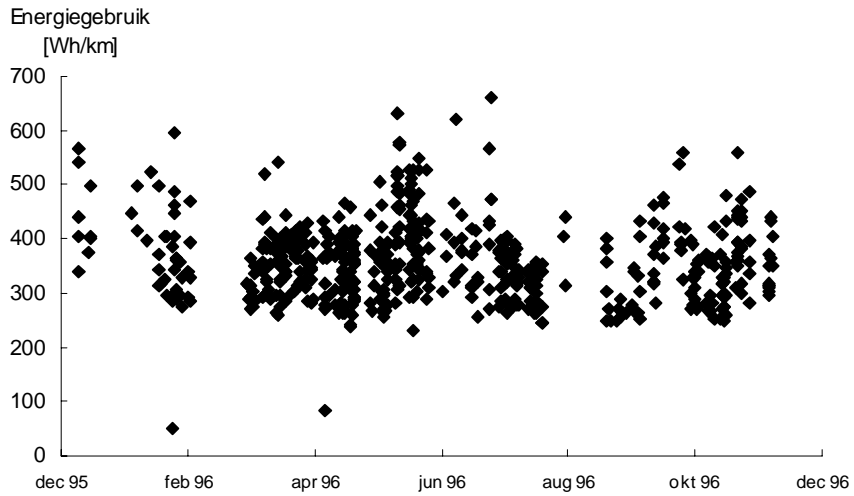
LG-HB-23 RET



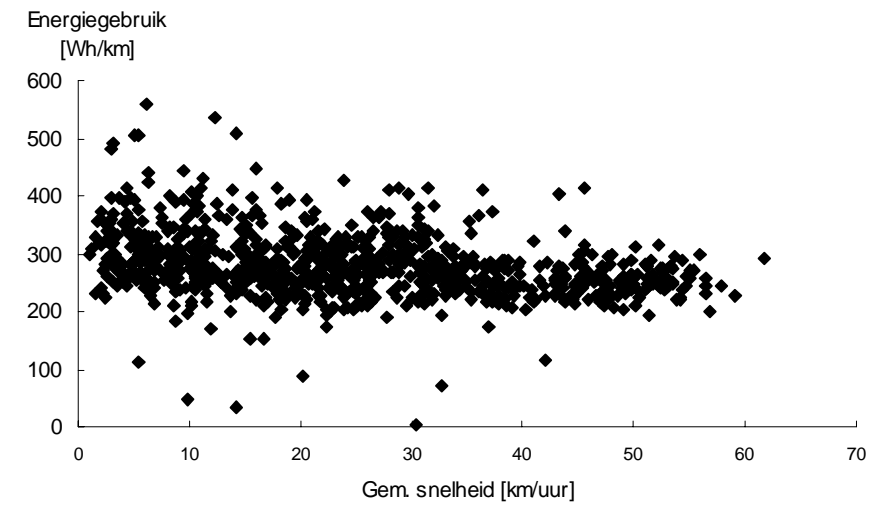
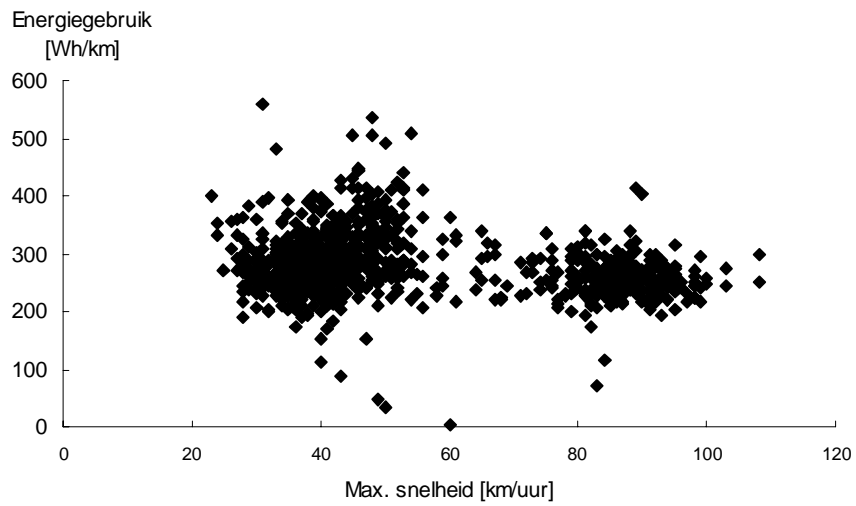
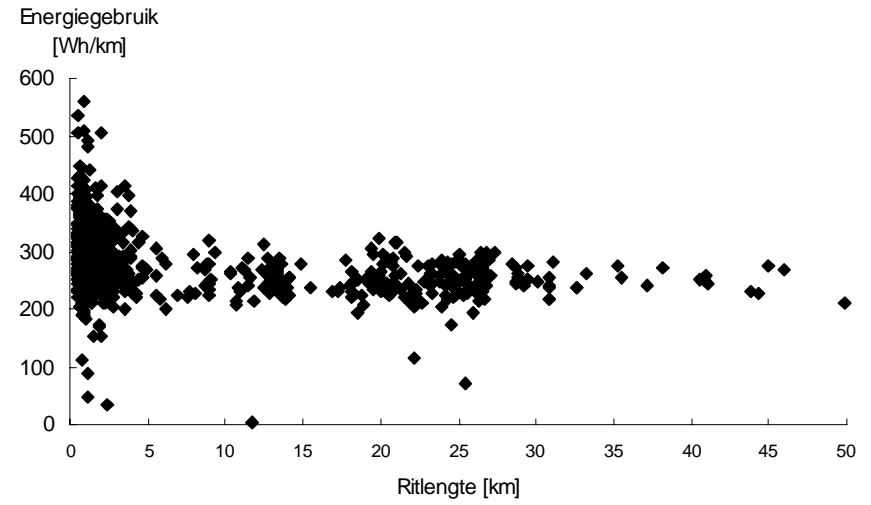
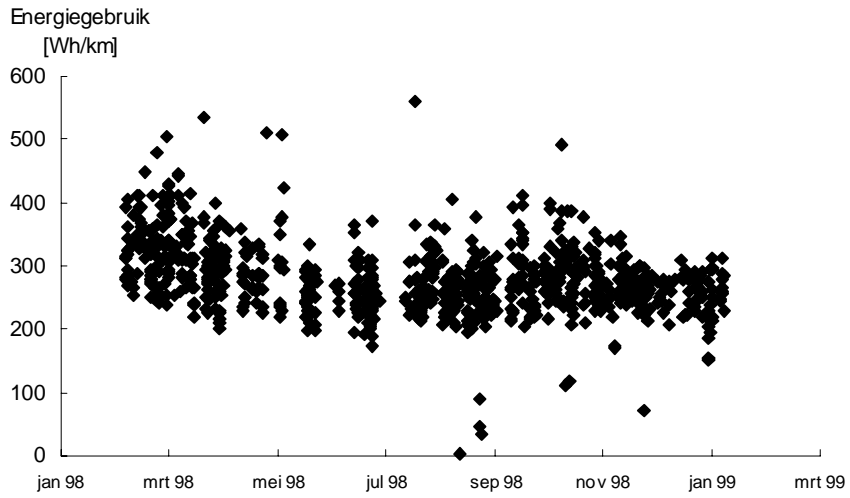
LG-HB-24



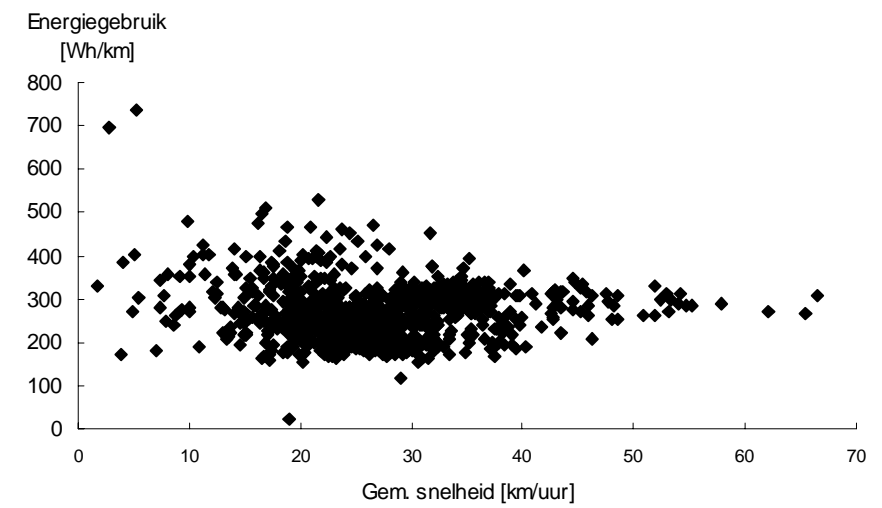
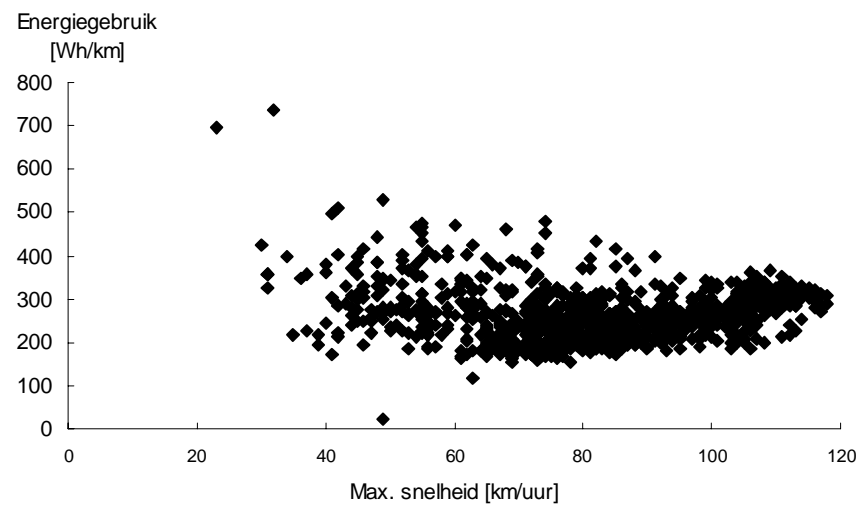
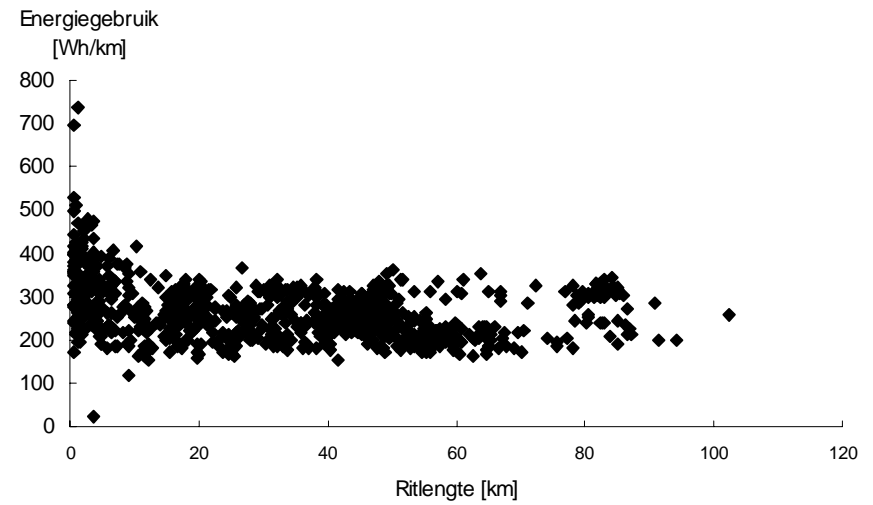
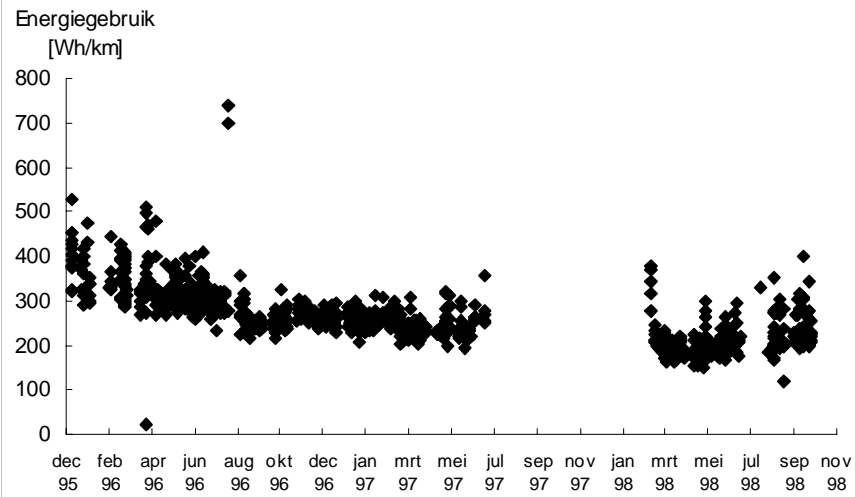
LG-HB-25



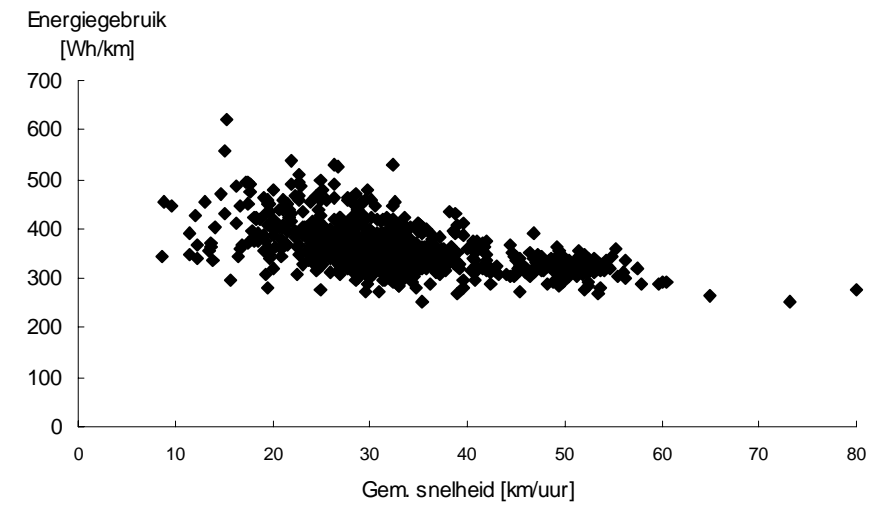
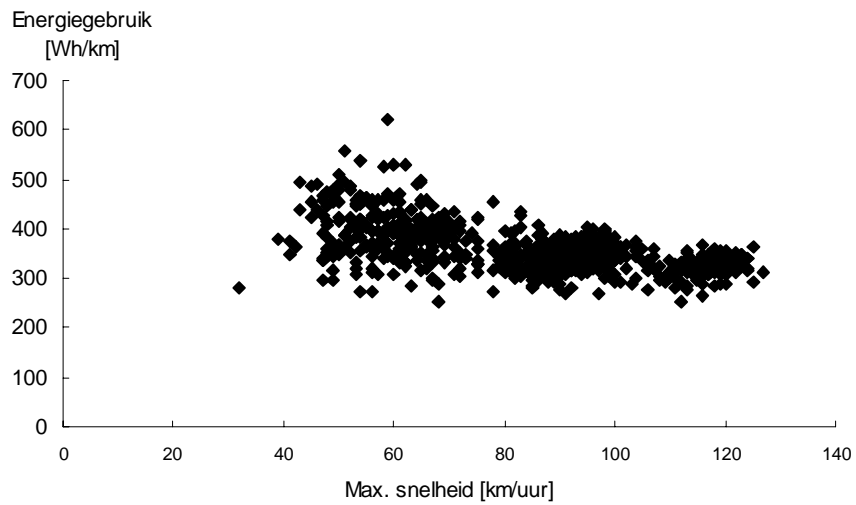
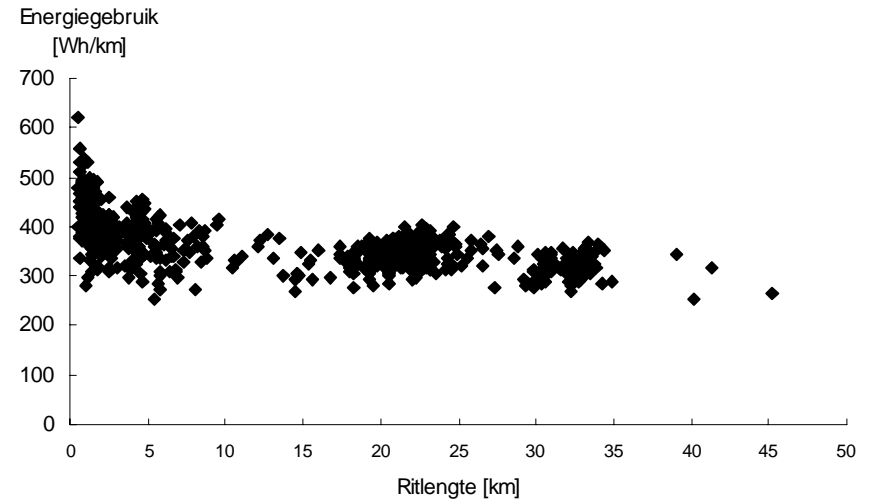
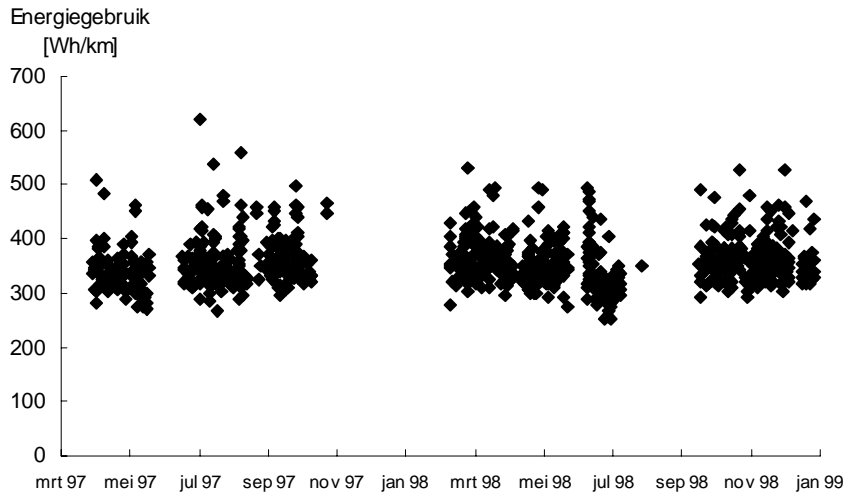
LG-HB-26 HAM



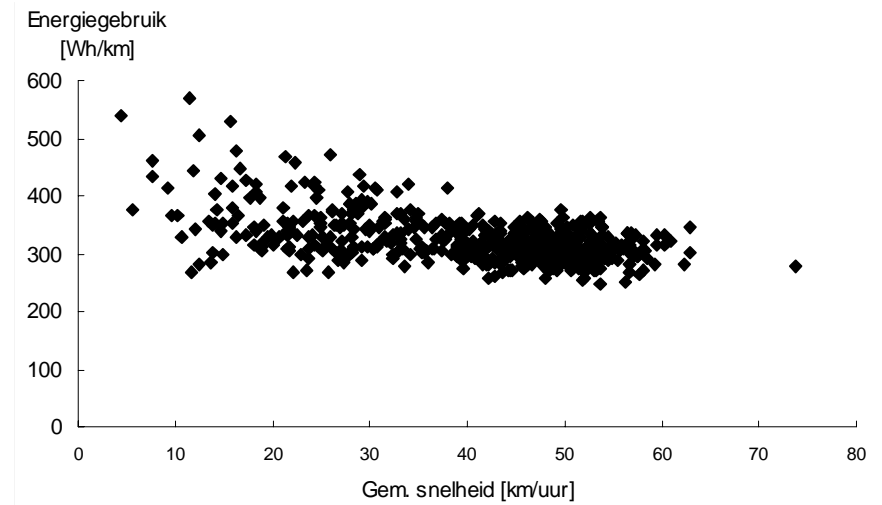
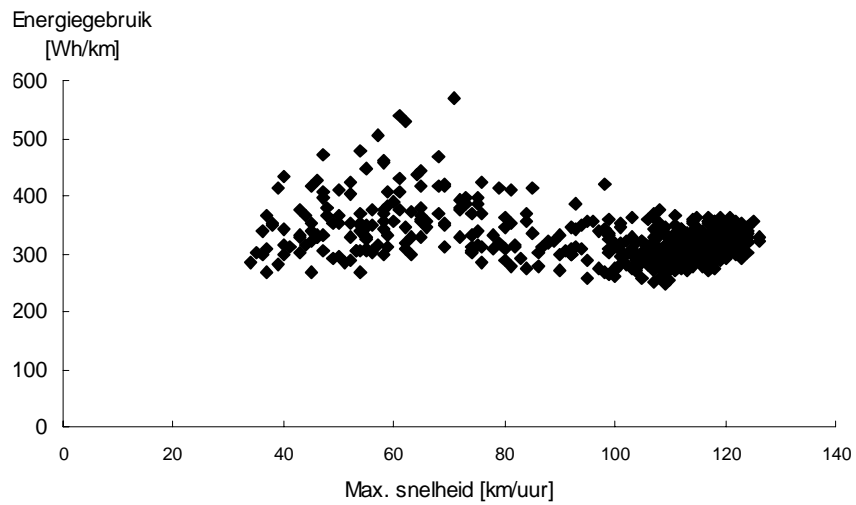
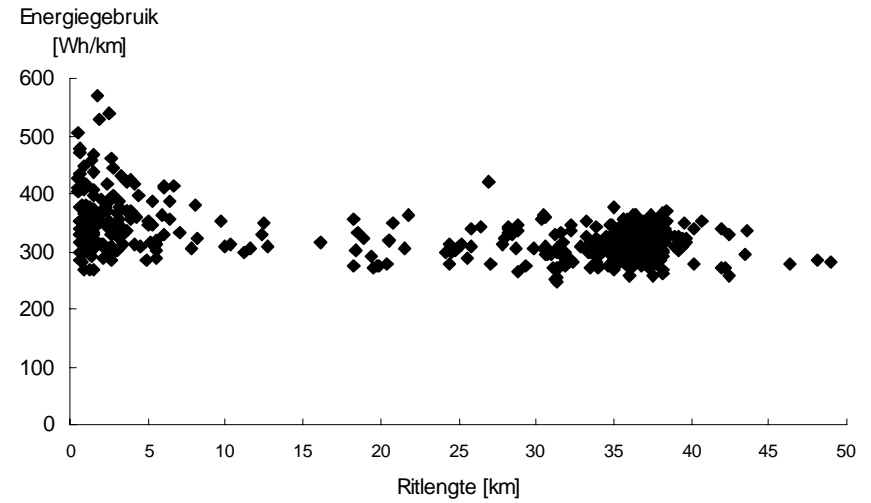
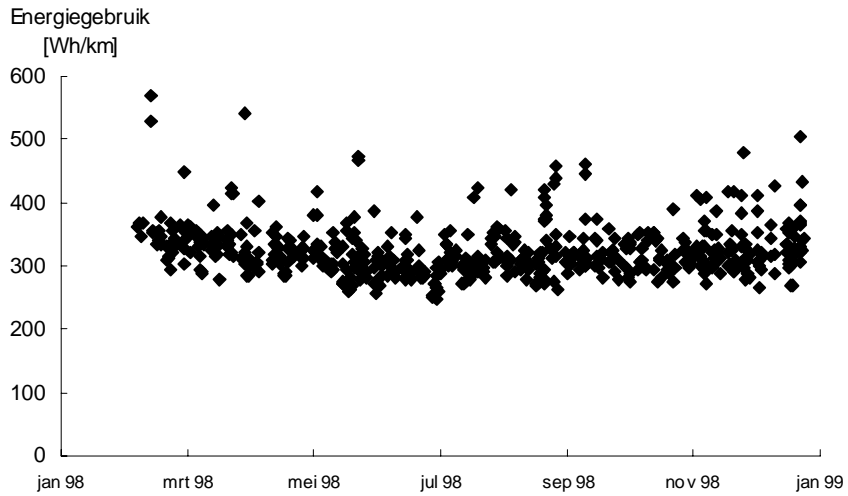
LG-HB-26 ECN



LG-HB-27



PL-DD-33



PL-DD-35