UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

School voor Mobiliteitswetenschappen

master in de mobiliteitswetenschappen

Masterthesis

Laadbehoefte predictie in regio Rotterdam op basis van verschillende EV-adoptie scenarios

Jules van Leeuwen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de mobiliteitswetenschappen, afstudeerrichting mobiliteitsmanagement

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Bruno KOCHAN

BEGELEIDER :

De heer Roeland PAUL

2019
2020

UHASSELT
KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be
Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

School voor Mobiliteitswetenschappen

master in de mobiliteitswetenschappen

Masterthesis

Laadbehoefte predictie in regio Rotterdam op basis van verschillende EV-adoptie scenarios

Jules van Leeuwen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de mobiliteitswetenschappen, afstudeerrichting mobiliteitsmanagement

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Bruno KOCHAN

BEGELEIDER :

De heer Roeland PAUL

Voorwoord

Voor u ligt mijn onderzoek binnen de masterproef voor de studie Mobiliteitsmanagement aan de Universiteit Hasselt, dat is uitgevoerd in de periode september 2019 tot en met juni 2020. In dit onderzoek is een methode toegepast om de toekomstige publieke laadbehoefte voor elektrische voertuigen in een gemeente te voorspellen, in dit geval voor de gemeente Rotterdam in Nederland. Hierbij gaat het zowel om de omvang van de laadbehoefte van elektrische voertuigen, als waar die behoefte voorkomt.

Sinds mijn bachelor ben ik mij steeds meer toe gaan leggen op mobiliteit en met name op elektrisch vervoer, aangezien dit in mijn ogen een belangrijk element is om de klimaatproblematiek tegen te gaan. In de loop der tijd werd mij steeds duidelijker dat (naast kosten) onvoldoende oplaadmogelijkheid een belangrijke hindernis is die adoptie tegenhoudt. In Nederland heeft dit probleem een uniek element aangezien een groot deel van de woningen geen eigen oprit of garage heeft, en dus geen mogelijkheid heeft tot realisatie van een privé laadpunt. Tijdens mijn stage in 2019 werd mij duidelijk dat een groot deel van de gemeentes in Nederland voornamelijk reactief aan de laadbehoefte voldoet, oftewel pas nadat er een aanvraag van een eigenaar van een elektrisch voertuig binnenkomt. Hier kwam het idee op om te onderzoeken wat de publieke laadbehoefte zou bedragen in de toekomst, en waar deze zich zou bevinden.

Tijdens de zomer van 2019 kwam ik met dit idee in gesprek met mijn begeleider Bruno Kochan en vervolgens ben ik begonnen met het schrijven van deze masterproef. In het voorjaar van 2020 ontstond de coronacrisis in Europa, wat voor wat vertraging zorgde. Echter is uiteindelijk het onderzoek, met enige aanpassing, succesvol afgerond. Graag wil ik hiervoor Bruno Kochan bedanken, wie mij geholpen heeft met het sturen van mijn onderwerp, het ontwikkelen en toepassen van de methodologie en het geven van feedback. Ook wil ik mijn stage organisatie Royal HaskoningDHV bedanken voor het verschaffen van een stageplek waar ik mij kon verdiepen in een toekomstverkenning van elektrisch vervoer en waar het onderwerp voor deze masterproef naar voren kwam.

Jules van Leeuwen

Sittard, 8 juni 2020

Deze masterproef werd geschreven tijdens de COVID-19 crisis in 2020. Deze wereldwijde gezondheidscrisis heeft een impact gehad op het schrijf- en verwerkingsproces, de onderzoekshandelingen en de onderzoeksresultaten die aan de basis liggen van dit werkstuk omdat een toegenomen werkdruk heeft geleid tot vertraging in het feedback- en communicatieproces, waardoor data-analyse vertraging opliep en daardoor is bijgestuurd naar een alternatieve opzet.

Samenvatting

Om globale en lokale milieuvervuiling tegen te gaan zijn in verschillende sectoren doelen gesteld om uitstoot te beperken. Voor de mobiliteitssector houdt dit onder andere in dat de Nederlandse overheid gesteld heeft dat vanaf 2030 alle nieuw verkochte auto's elektrisch moeten zijn, wat ondersteund wordt met verschillende stimulerende maatregelen. Hierdoor is de adoptie van elektrische voertuigen groeiende en raken consumenten steeds geïnteresseerder in elektrisch rijden. Onvoldoende oplaadmogelijkheid is echter een belangrijke reden voor consumenten om geen elektrisch voertuig aan te schaffen, wat kan komen doordat het grootste deel van de woningen in Nederland geen mogelijkheid heeft om thuis een privé laadpunt te realiseren. Om dit obstakel weg te nemen is een dekkend en toekomstbestendig publiek laadnetwerk nodig. Bij veel gemeenten heerst echter onduidelijkheid over hoe zij om moeten gaan met de plaatsing van laadpunten omdat onbekend is waar de laadbehoefte zich gaat ontwikkelen, wat vaak resulteert in ad-hoc beleid. Daarom heeft dit onderzoek als doel om een methode toe te passen die de omvang en locatie van de toekomstige publieke laadbehoefte nabij thuislocaties bepaalt, die voortkomt uit de dagelijkse routine, per zone en in totaal voor de gemeente Rotterdam als adoptie van elektrische voertuigen toeneemt in de toekomst.

Hiervoor is een activiteiten-gebaseerd transportmodel gebruikt, wat alle trips en activiteiten voorspelt voor personen in Rotterdam over één dag door per persoon een dagschema op te stellen en dit daarna uit te voeren. Vervolgens zijn op basis van deze voorspellingen een set toekomstige adoptiescenario's geanalyseerd voor 2025, 2030 en 2035, waarin is bepaald welke personen een elektrisch voertuig zijn toebedeeld, hoeveel zij hiermee rijden en waar zij deze vervolgens weer opladen. Hiervoor zijn verschillende locatiescenario's aangenomen die beschrijven hoeveel personen bij thuis laden en hoeveel bij werk, omdat dit de voornaamste plaatsen zijn waar men de mogelijkheid heeft om de laadbehoefte te voldoen binnen de dagelijkse routine. Uiteindelijk is hieruit per zone in de gemeente Rotterdam en per uur de laadbehoefte geaggregeerd voor alle opgestelde scenario's.

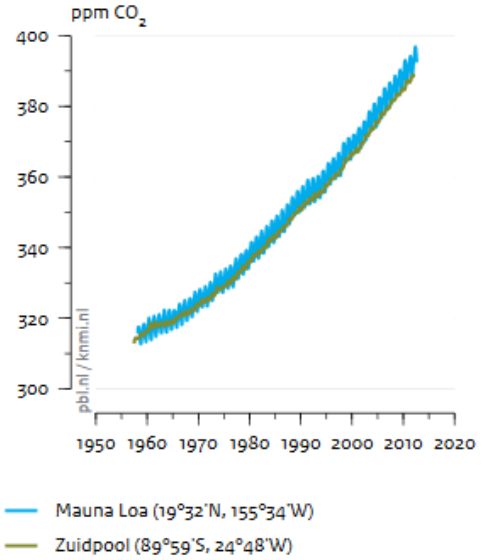
Uit deze analyse blijkt dat de laadbehoefte in de gemeente Rotterdam in de komende jaren een behoorlijke groei kan verwachten als adoptie verloopt zoals geprognotiseerd in de literatuur. In 2018 bedroeg de jaarlijkse laadbehoefte in de gemeente Rotterdam 4,4 miljoen kWh, inclusief thuisladers, werkladers en snelladers. Voor 2025 in het scenario met de meeste thuisladers is de jaarlijkse publieke laadbehoefte gegroeid naar 4,7 miljoen kWh. Vijf jaar later is deze gegroeid naar 12,9 miljoen kWh en in 2035 bedraagt de publieke laadbehoefte 26,5 miljoen kWh. Verder blijkt dat meer personen die bij werk laden leidt tot een daling in de publieke laadbehoefte nabij thuis, welke ruwweg overeenkomt tussen de verschillende scenario's van 2025, 2030 en 2035. Echter geldt in 2025 een ietwat kleinere publieke laadbehoefte als meer mensen bij werk laden ten opzichte van de scenario's die verder in de toekomst liggen. Ook op zoneniveau blijkt dat de laadbehoefte per zone per dag een groei ervaart in de komende vijftien jaar, van gemiddeld 9,4 kWh per dag in 2025 tot 52,6 kWh per dag in 2035. Zodoende laat dit onderzoek zien hoe de laadbehoefte ontwikkelt in de komende jaren in Rotterdam, aangenomen dat het activiteitenpatroon en reisgedrag niet veranderen en zonder rekening te houden met mogelijke fysieke of institutionele beperkingen. De gemeente Rotterdam kan hiermee rekening houden bij het plaatsingsbeleid en de uitrol van laadinfrastructuur. Eventueel vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op de laadbehoefte voortkomend uit snelladers en bij werklocaties, alsook op het modelleren van een langere periode dan één dag.

Inhoud

Voorwoord 1
Samenvatting 2
1. Introductie 5
2. Theoretisch kader 11
2.1 Elektrisch vervoer in Nederland 11
Geschiedenis 11
Elektrische voertuigen 12
Laadinfrastructuur 17
Beleid 19
Prognoses 26
Rotterdam 29
Plaatsingsbeleid in Nederland 30
2.2 Activiteiten-gebaseerde modellen 32
2.3 Voorspelling en bepaling laadbehoefte en -locatie 35
3. Methodologie 43
3.1 Literatuurstudie 43
3.2 Voorspelling laadbehoefte en -locatie 43
3.2.1 FEATHERS-model 43
3.2.2 Output FEATHERS Rotterdam 44
3.2.3 Data-analyses en scenario's 46
3.2.3 Scenario overzicht 49
4. Resultaten 51
4.1 Adoptiescenario 2025 51
4.2 Adoptiescenario 2030 57
4.3 Adoptiescenario 2035 63
5. Conclusie 69
6. Discussie 73
7. Referenties 75

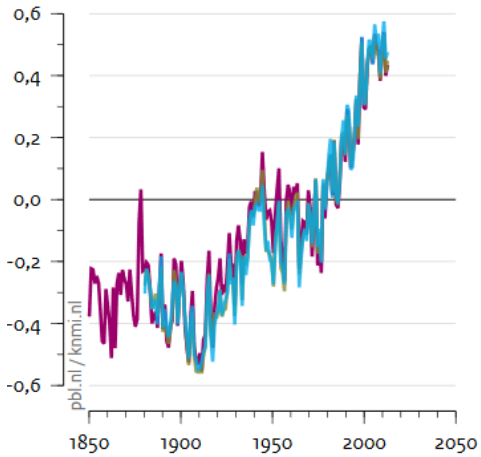
1. Introductie

De afgelopen decennia is klimaatverandering door toename van broeikasgasemissies een steeds groter probleem geworden doordat veel indicatoren wijzen op het snel veranderende klimaat. Sinds de industriële revolutie zijn de concentraties van broeikasgassen zoals koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) toegenomen tot waardes die minstens 800.000 jaar niet zijn voorgekomen. Dit heeft ervoor gezorgd dat vanaf de jaren '50 veranderingen zijn waargenomen in het klimaatsysteem die zich nooit eerder in zo'n kort tijdsbestek hebben voorgedaan. De atmosfeer en oceaan zijn opgewarmd, de zeespiegel is gestegen en de hoeveelheid ijs is afgenomen. Dit leidt tot meer extremere weerssituaties, zoals hittegolven, droogte en extremere neerslag. Meer specifiek heeft dit onder andere impact op het overstromingsrisico, zoetwatervoorziening, biodiversiteit en voedselvoorziening. Het is zeer waarschijnlijk dat menselijke invloed de belangrijkste oorzaak is van deze waargenomen veranderingen vanaf de periode na de Tweede Wereldoorlog (PBL & KNMI, 2015).



Grafiek 1: CO_2 concentraties in de atmosfeer (PBL & KNMI, 2015)

Vanaf het eind van de jaren '80 begon de aandacht voor deze klimaatproblematiek toe te nemen. In 1988 richtten het milieuprogramma van de Verenigde Naties en de Wereld Meteorologische Organisatie het *Intergovernmental Panel on Climate Change* op, oftewel het IPCC. Sindsdien rapporteert het IPCC over klimaatverandering, wat vaak als basis dient voor milieubeleid bij vele regeringen. In 1992 werd een internationaal klimaatverdrag opgesteld in Rio de Janeiro met als doel de opwarming van de aarde tegen te gaan door uitstoot van broeikasgassen te beperken. 196 landen tekenden het verdrag, waaronder Nederland en België. In Kyoto werd drie jaar later het verdrag bindend bij wet en in de jaren die volgden werd het verdrag verder uitgebreid. Het meest recente verdrag werd gesloten in Parijs in 2015, met als doel om de acties die nodig zijn voor een duurzame toekomst te versnellen en intensiveren. Het hoofddoel bedroeg dat de opwarming van de aarde beperkt moet blijven tot maximaal 2 graden Celsius in vergelijking met pre-industriële niveaus om de meest extreme effecten tegen te gaan (UNFCC, 2019).

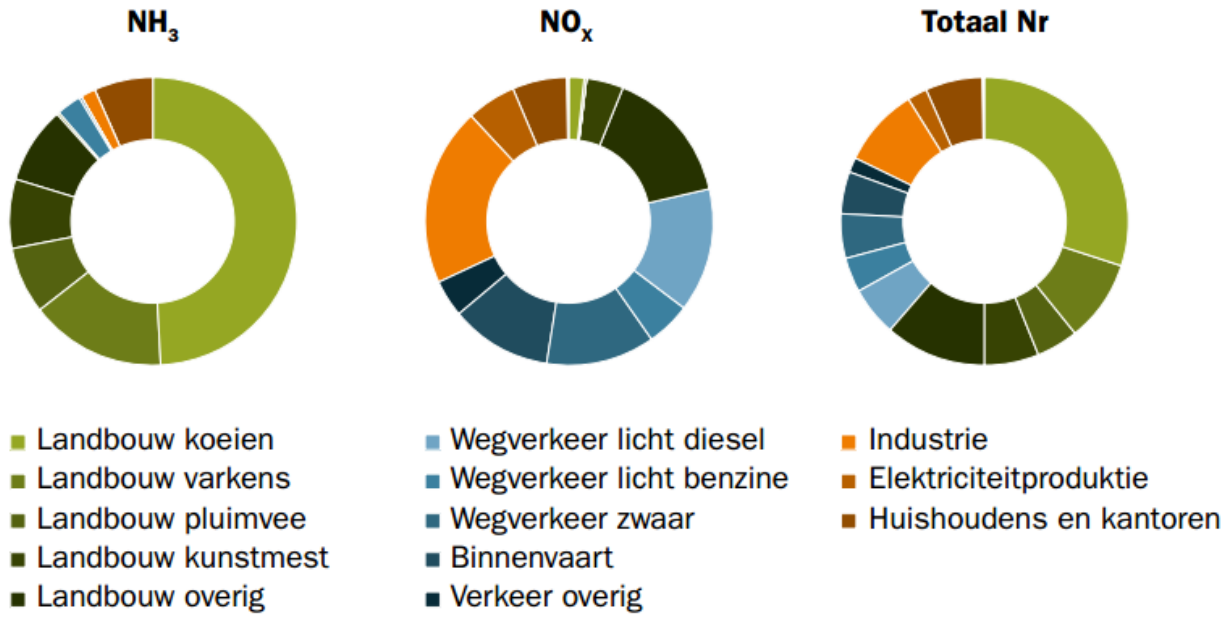


Grafiek 2: Temperatuurafwijking t.o.v. 1961-1990 (PBL & KNMI, 2015)

De Nederlandse overheid heeft naast het Parijs-akkoord doelen gesteld om klimaatverandering tegen te gaan en de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. In de zogenoemde Klimaatwet is vastgesteld dat Nederland in 2030 49% minder CO_2 uit moet stoten dan in 1990 en 95% minder in 2050. Om dit doel te bereiken zijn in het Klimaatakkoord afspraken gemaakt door de overheid, het beijdrfsleven en

maatschappelijke organisaties. Dit akkoord bevat een pakket aan maatregelen voor elke sector die een substantiële bijdrage levert aan de emissie; gebouwen, landbouw, elektriciteit, industrie en mobiliteit (Rijksoverheid, 2019b). Recent heeft het Planbureau voor de Leefomgeving deze geplande maatregelen geanalyseerd en kwam hierbij tot de conclusie dat het maatregelenpakket niet voldoende is om aan de doelstelling te voldoen. Met het Klimaatakkoord wordt een emissiereductie behaald van 43-48% in 2030 (PBL, 2019). Na dit rapport heeft het kabinet direct aangekondigd dat diverse maatregelen verzwaard of versneld worden om de doelstelling toch te halen. Ook komt er extra subsidie voor projecten in duurzame energie (Klimaatakkoord, 2019c).

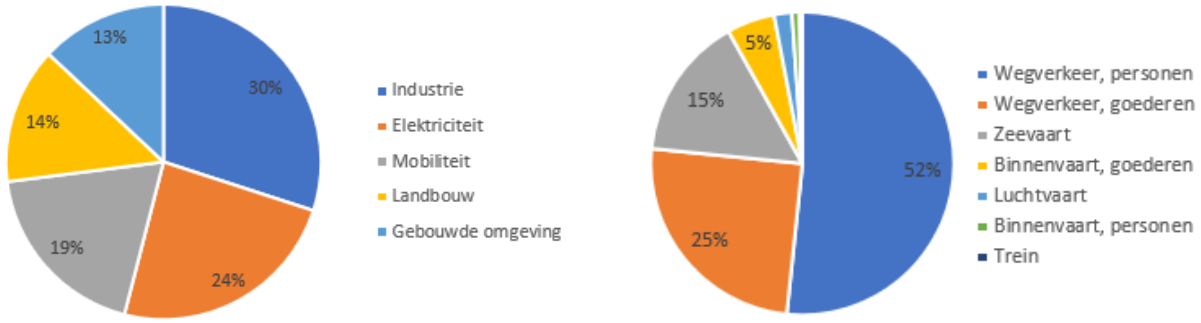
Naast de mondiale klimaatproblematiek speelt er op een lager niveau ook het probleem rond stikstofverbindingen. Stikstof op zich is niet schadelijk voor het milieu of voor de mens, reactief stikstof kan dat echter wel zijn. Dit zijn verbindingen die stikstof bevatten en in normale hoeveelheden onmisbaar zijn voor de natuur. Een overmaat leidt echter tot problemen. Emissie van deze stikstofverbindingen in de lucht reageert tot fijnstofdeeltjes en is schadelijk voor de gezondheid, voornamelijk voor mensen met longklachten of astma. Depositie van stikstofverbindingen naar de grond zorgt ervoor dat de bodem te veel opneemt, wat via verzuring en vermesting kan leiden tot een verminderde biodiversiteit (RIVM, 2019). De belangrijkste stikstofemissies veroorzaakt door de mens zijn ammoniak (NH_3) en stikstofoxiden (NO_x). Een overmaat aan ammoniak zorgt voornamelijk voor stikstofdepositie en is in Nederland voor het overgrote deel afkomstig uit de landbouw (86%). Stikstofoxiden komen vooral vrij bij verbranding van fossiele brandstoffen en zorgen voor luchtwegklachten en infecties, maar dragen ook bij aan degradatie van de biodiversiteit. Stikstofoxiden worden voornamelijk geproduceerd door het wegverkeer (31%) en de industrie (20%). Als gekeken wordt naar de totale uitstoot van reactief stikstof uit zowel ammoniak als stikstofoxiden, dan blijkt dat de landbouw verantwoordelijk is voor het grootste deel (61%), gevolgd door het wegverkeer (15%) (TNO, 2019). Dit komt doordat Nederland de op één na grootste landbouwexporteur ter wereld is (CBS, 2019b).



Figuur 1: Herkomst van ammoniak, stikstofoxiden en totaal reactief stikstof per sector in 2017 (TNO, 2019)

Wat betreft stikstofemissies per hectare behoort Nederland niet alleen tot de grootste uitstoters van Europa, maar zelfs van de wereld. Binnen Europa behoort Nederland tot de regio met de hoogste populatiedichtheid en economische activiteit. De totale stikstofemissie per hectare is zelfs vier keer zo groot dan het gemiddelde van Europa (TNO, 2019). Wereldwijd staat Nederland ook in de top als gekeken wordt naar emissie per hectare en wat betreft de ammoniakuitstoot van de landbouw behoort Nederland zelfs tot de bovenste vijf landen (Volkskrant, 2019a). Nederland is echter al sinds de jaren ’80 bezig om stikstofemissies te verminderen, en dit is ook gebeurd. Echter is deze daling de laatste jaren afgevlakt (RIVM, 2019). Wat hieraan bijgedragen kan hebben is het Programma Aanpak Stikstof (PAS), wat in 2015 is ingevoerd. Het PAS had als doel om de stikstofemissie terug te brengen, maar ook ruimte te bieden aan economische activiteiten waarbij stikstof vrijkomt. Als een ondernemer of gemeente vermeldde dat maatregelen genomen zouden gaan worden om stikstofemissie te beperken, dan werd een vergunning verleend (Sikkema, 2019). In mei 2019 oordeelde de Raad van State echter dat dit beleid niet volstaat en zo ontstond een zogenaamde ‘stikstofcrisis’. Onder andere bouw- en infrastructuurprojecten kwamen stil te liggen en de politiek bleek verdeeld over hoe dit probleem aangepakt diende te worden (Volkskrant, 2019b). Dit leidde tot hevige protesten en acties onder zowel de landbouw als de bouw (Elsevier, 2019). Na flinke discussie in de politiek en de maatschappij zijn er verschillende maatregelen genomen om de stikstofdepositie te verminderen, zoals verlaging van de maximumsnelheid op de snelwegen, opkopen van veehouderijen en investeren in duurzamere stallen (Rijksoverheid, 2019c).

De mobiliteitssector is een van de sectoren die bijdraagt aan zowel de klimaatproblematiek als de stikstofproblematiek. Qua broeikasgassen neemt de mobiliteitssector de derde plaats in met 19%, achter de industrie en de elektriciteitssector (CBS, 2019e). Binnen de mobiliteitssector zorgt wegverkeer voor de grootste emissie met 77%, gevolgd door zeevaart, binnenvaart en luchtvaart (CBS, 2019a).



Figuur 2: CO_2-equivalent emissie in Nederland per sector (CBS, 2019)

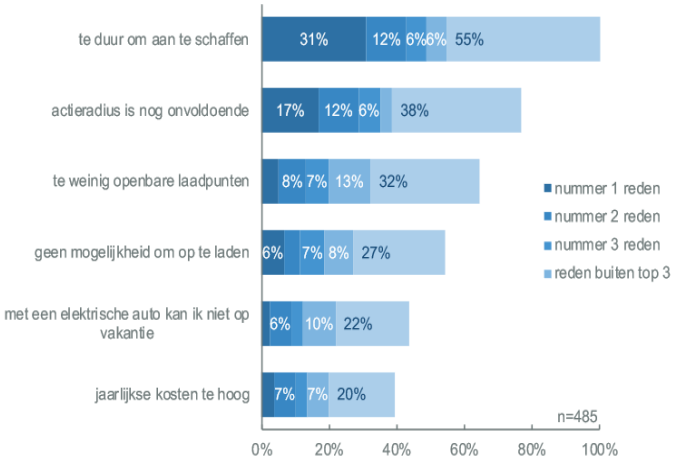
De stikstofemissie welke veroorzaakt is door de mobiliteitssector bedraagt een minder groot, maar nog steeds substantieel aandeel (15%). Deze emissie wordt uitgestoten door voertuigen met verbrandingsmotor in de vorm van stikstofoxiden (TNO, 2019).

Om broeikasgasemissies tegen te gaan is een omvattend maatregelenpakket opgesteld. Voor de sector mobiliteit houdt dit onder andere in dat elektrische personenauto’s de norm moeten worden en dat de laadinfrastructuur verder wordt uitgerold. Hiervoor zijn verschillende maatregelen aangekondigd, zoals aanschafsubsidie voor particulieren. Meer specifiek is de doelstelling dat vanaf 2030 alle nieuw verkochte auto’s elektrisch moeten zijn aangedreven en dat bijbehorend een bestendige laadinfrastructuur gerealiseerd moet worden zodat opladen van een elektrisch voertuig net zo makkelijk wordt als opladen

van een mobiele telefoon (Rijksoverheid, 2019a). In het ontwerp Klimaatakkoord hield dit in dat er in 2030 twee miljoen elektrische voertuigen moeten rondrijden (Rijksoverheid, 2018). Elektrificatie van het wegvervoer heeft namelijk positieve effecten op het klimaat, de luchtkwaliteit en geluidsoverlast. Dit komt doordat een elektromotor de energie efficiënter omzet dan bij voertuigen met verbrandingsmotor. Ook zijn deze motoren stiller. Uit analyse van de voertuig en brandstofketens (*well-to-wheel*) blijkt dat een volledig elektrisch voertuig bij gebruik van grijze stroom over de gehele levensduur 30% minder broeikasgasemissies uitstoot ten opzichte van een gemiddelde benzineauto. Gebruik van groene stroom zorgt voor een reductie van 70%. Echter, elektrisch vervoer staat nog aan het begin van zijn ontwikkeling en de verwachting is dat de energie-efficiëntie zal toenemen de komende jaren. Daarnaast stoten volledig elektrische voertuigen geen stikstofoxiden uit en dragen daarmee bij aan het tegengaan van de stikstofproblematiek (TNO, 2015).

Vanaf ongeveer 2010 heeft een verandering ingezet in de mobiliteitssector naar elektrisch aangedreven voertuigen, te zien aan de adoptiecijfers en aan het stijgende aantal elektrische modellen. Voor personenvoertuigen lijkt het erop dat (in tegenstelling tot brandstofcelvoertuigen op waterstof) het voertuig met batterij het dominante ontwerp gaat worden als gekeken wordt naar de adoptiecijfers. Ondanks de groei in adoptie van deze batterij-elektrische voertuigen is het aandeel ten opzichte van het totale aantal personenvoertuigen in Nederland nog klein (ongeveer 1%). Echter is sinds enkele jaren exponentiële groei te zien, waardoor hoogst waarschijnlijk het aantal batterij-elektrische voertuigen zal blijven toenemen de komende tijd. Door de initieel hoge prijs van batterij-elektrische voertuigen hadden veel eigenaren waarschijnlijk een eigen laadpunt ter beschikking op hun oprit of in hun garage. Dit is te zien aan het veel hogere aantal privé laadpunten in tegenstelling tot het aantal publieke laadpunten in Nederland (RVO, 2020). Daarnaast geniet thuisladen ook de voorkeur van elektrische rijders (Spoelstra, 2014). Echter zijn er de afgelopen jaren steeds meer goedkopere modellen op de markt gekomen en zullen de komende jaren ook steeds meer goedkope modellen verschijnen, wat kan zorgen voor een toename in adoptie onder een breder deel van de samenleving (RVO, 2020).

Tegelijkertijd raken steeds meer Nederlanders bekend met elektrisch rijden en een meerderheid van de Nederlandse consumenten overweegt een elektrische auto aan te schaffen. Na de nog hoge aanschafprijs is onvoldoende publieke oplaadmogelijkheid een van de belangrijkste redenen om geen elektrische auto te kopen (ANWB, 2018). Dit zou verklaard kunnen worden door het feit dat het grootste gedeelte van de woningen in Nederland bestaat uit appartementen en tussenwoningen (57,5%), waarbij vaak geen mogelijkheid is tot realisatie van een eigen privé laadpunt (CBS, 2016). Hierdoor is het nodig om een adequaat, dekkend en toekomstbestendig publiek laadnetwerk te realiseren om het groeiende aandeel van elektrische voertuigen te kunnen bedienen en dit obstakel tot adoptie weg te nemen zodat een breder



Grafiek 3: Redenen tot geen interesse in elektrische auto van niet geïnteresseerden (ANWB, 2018)

deel van de populatie makkelijker toegang krijgt tot een laadpunt. Bij veel gemeenten heerst momenteel echter onduidelijkheid over de laadbehoefte en hoe deze zich ontwikkelt, wat vaak resulteert in ad-hoc beleid bij plaatsing van publieke laadpunten (NKL, 2017). Daarom kunnen gemeenten voordeel hebben bij kennis over hoe de publieke laadbehoefte zich ontwikkelt in een bepaald gebied, zodat hierop geanticipeerd kan worden als de adoptie van batterij-elektrische voertuigen verder toeneemt de komende jaren.

Voor het bepalen van de laadbehoefte en -locatie zijn verschillende methodes bekend in de literatuur. Er is gebruik gemaakt van *set-covering* (Frade, Ribeiro, Gonçalves, & Antunes, 2011; Wang & Lin, 2009), agent-gebaseerde modellen (Stephan & Sullivan, 2004; Sweda & Klabjan, 2011), een equilibrium model (He et al., 2013), *continous facility location* modellen (Sathaye & Kelley, 2013), een regressiemodel (van Montfort et al., 2016) en een *mixed-integer non-linear* model (Sadeghi-Barzani et al., 2014). Deze methodes houden echter geen rekening met het feit dat het opladen van een elektrisch voertuig meerdere uren in beslag kan nemen. Voor normale 'langzame' laadpunten heeft het daarom de voorkeur om het activiteitenpatroon van bestuurders in acht te nemen, waardoor opgeladen kan worden op een activiteitenlocatie waar de bestuurder meerdere uren verblijft, zoals bij de werklocatie of thuis. Er zijn ook meerdere methodes bekend die hier wel rekening mee houden (Dong et al., 2014; González et al., 2014; Shahraki et al., 2015; Xi et al., 2013). Bij deze methodes wordt er echter vaak van uitgegaan dat voertuigen altijd thuis kunnen opladen bij een privé laadpunt of dat de mogelijke locaties of aantallen van de laadpunten van tevoren vaststaan. Daarom is het doel van dit onderzoek om een bijdrage te leveren aan de elektrificatie van het personenvervoer door een methode toe te passen op Rotterdam in Nederland, rekening houdend met de (on)mogelijkheid tot privé thuisladen en zonder dat de mogelijke locaties van tevoren vastgesteld zijn. Meer specifiek houdt dit in dat een activiteiten-gebaseerd transportmodel wordt gebruikt om de trips van autogebruikers in Rotterdam te voorspellen, waarna hiermee enkele toekomstscenario's van adoptie van batterij-elektrische voertuigen worden geanalyseerd, zodat kennis van verschillende situaties beschikbaar is als adoptie anders loopt dan verwacht. Hieruit wordt vervolgens de publieke laadbehoefte nabij thuislocaties per zone voor de verschillende scenario's voor de gemeente Rotterdam bepaald. Dit kan gemeenten in het algemeen, maar specifiek Rotterdam, een beter beeld geven van de situatie van publieke laadbehoefte als in de komende jaren adoptie van batterij-elektrische voertuigen toeneemt. Dit leidt tot de volgende onderzoeksvraag;

Hoe ontwikkelt de publieke laadbehoefte zich in totaal en per zone in Rotterdam op basis van verschillende adoptiescenario's van batterij-elektrische voertuigen?

In dit rapport wordt in het theoretisch kader eerst uitgeweid over de opkomst en huidige situatie van elektrisch vervoer in Nederland en Rotterdam, alsook de prognoses. Daarna wordt ingegaan op het plaatsingsbeleid in Nederland, activiteiten-gebaseerde modellen en wat al bekend is in de literatuur over de bepaling van laadpaalbehoefte of -locatie. In de methodologie wordt stapsgewijs weergegeven hoe het onderzoek is uitgevoerd en hoe de scenario's zijn opgesteld. De resultaten laten de uitkomsten over de laadbehoeftes zien voor de verschillende scenario's, waarna in de conclusie en discussie wordt ingegaan op de voornaamste inzichten, beperkingen en aanbevelingen voor verder onderzoek.

2. Theoretisch kader

In dit onderdeel wordt dieper ingegaan op de theoretische achtergrond van het onderzoek. Ten eerste wordt de huidige situatie van elektrisch vervoer in Nederland besproken, hoe deze is ontstaan, de beleidssituatie, wat de prognoses zijn en de situatie in Rotterdam. Vervolgens wordt uitgeweid over activiteiten-gebaseerde modellen en wat voor toegevoegde waarde deze kunnen hebben in bepaalde toepassingen. Als laatste volgt een literatuurstudie rondom bepaling van de laadbehoefte en -locatie en wat hier al over bekend is.

2.1 Elektrisch vervoer in Nederland

Geschiedenis

De elektrische auto wordt momenteel door velen gezien als een innovatie op het gebied van mobiliteit en milieu. Echter stammen de eerste elektrische auto's al uit de begintijd van de auto-industrie, waar deze concurreerden met auto's met verbrandings- en stoommotoren. De uitvinding van de eerste elektrische auto in de 19e eeuw, na de ontdekking van elektromagnetisme, wordt aan verschillende makers toebedeeld. In 1827 bouwde de Hongaar Adyos Jedlik de eerste elektromotor die een klein schaalmodel van een auto aandreef. Enkele jaren later (1835) bouwde de Nederlandse professor Stratingh ook een klein elektrisch aangedreven voertuig. In dat jaar werd door de Amerikaan Thomas Davenport ook de eerste kleine elektrische locomotief gebouwd. De ontwikkeling van deze eerste modellen werd echter tegengehouden door de beperkte batterijcellen die toentertijd niet herlaadbaar waren waardoor de kosten hoog uitvielen. Pas in 1873 werd een elektrisch auto uitgevonden die functioneerde op de openbare weg. Tegelijkertijd stond de ontwikkeling van batterijen niet stil en werden er verschillende dynamo's en elektromechanische generatoren uitgevonden (Guarnieri, 2012).

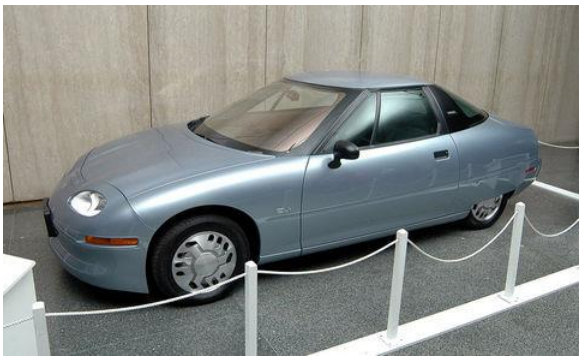
Figuur 3: Schaalmodel elektrische auto van Stratingh (ANWB, 2019)

De doorbraak kwam in Frankrijk, waar in 1881 de herlaadbare loodaccu werd uitgevonden (ANWB, 2019). Aan het einde van de 19e eeuw zorgde dit voor een doorbraak van verschillende elektrische modellen in zowel Engeland, Frankrijk, België en de Verenigde Staten. Deze modellen konden maximaal zes mensen vervoeren en behaalden een snelheid van 16 tot 22 km/u. In België en Frankrijk ontstonden races met elektrische voertuigen, waarna in 1899 in België een elektrisch voertuig als eerste de grens van 100 km/u doorbrak (Guarnieri, 2012). In Nederland was in het begin van de 20e eeuw de elektrische auto ook populair, voornamelijk als taxi. In Amsterdam werd ATAX opgericht, wat een groot succes werd en een vloot van 60 elektrische taxi's in bedrijf had (ANWB, 2019). In deze periode had de elektrische auto wereldwijd succes en in de Verenigde Staten bestond het wagenpark voor meer dan een derde uit elektrische auto's. Concurrentie was er in de vorm van de stoomauto en de auto met verbrandingsmotor. Alle drie de modellen hadden echter hun voor- en nadelen. De stoomauto was

Figuur 4: Elektrische taxi in Amsterdam 1920 (ANWB, 2019)

snel en betrouwbaar, maar het duurde lang om te starten. De auto met verbrandingsmotor was ook snel en had een groot bereik, maar was onbetrouwbaar, zorgde voor vervuilende uitstoot en was moeilijker te bedienen. De elektrische auto stootte niks uit, was stil en makkelijk te bedienen, maar was wel duur, langzaam en had een klein bereik. Het elektrische voertuig werd gezien als luxe-model en door de hoge prijs werd deze vooral gekocht door rijke stedelingen. Na verloop van tijd werd het wegennetwerk steeds uitgebreider waardoor de vraag naar auto's met een groter bereik toenam. Tegelijkertijd daalde de olieprijzen en werd de auto met verbrandingsmotor goedkoper doordat Ford de lopende band introduceerde. De technologie verbeterde ook door de komst van de elektrische starter, wat de startproblemen van de auto met verbrandingsmotor wegnam. Rond 1920 verdween de elektrische auto van de markt en werd de verbrandingsmotor voor lange tijd het dominante ontwerp (Guarnieri, 2012).

Pas in de jaren '60 neemt de interesse in elektrische voertuigen weer toe. De olieprijzen stegen, wat zorgde voor tekorten aan benzine en deze piekten tijdens de oliecrisis van 1973. Dit leidde tot in de westerse wereld tot een focus op verminderde afhankelijkheid van olie, in Nederland vorm gegeven door de autoloze zondag en benzinebonnen (RTL Nieuws, 2019). In de Verenigde Staten werd een wet aangenomen die het mogelijk maakte om R&D richting elektrische en hybride voertuigen te ondersteunen. Ook begonnen verschillende autofabrikanten aan de ontwikkeling van elektrisch modellen. Deze voertuigen waren echter nog steeds inferieur aan de auto met verbrandingsmotor omdat de topsnelheid en het bereik te wensen over lieten. De interesse nam weer af nadat de oliecrisis aan zijn eind kwam. Toen in de jaren '90 de focus op klimaatverandering toenam kwam duurzaam en elektrisch vervoer weer in beeld. Het internationale klimaatverdrag werd gesloten en in de voor auto's bepalende markt van Californië werden wetten aangenomen om uitstoot te verminderen. Dit veroorzaakte kortstondig de productie van een aantal verbeterde elektrische modellen, maar de prijs was nog te hoog en door de goedkope benzineprijzen en groeiende economie was er weinig publieke interesse voor elektrische voertuigen (Department of Energy, 2014).



Figuur 5: GM EV1, geproduceerd 1996-2003 (Department of Energy, 2014)

In het begin van de 21e eeuw stond de ontwikkeling echter niet stil. Er werd doorgewerkt aan de technologie achter elektrische voertuigen, wat leidde tot een verbeterde batterij. Tegelijkertijd werd de eerste hybride auto uitgebracht, de Toyota Prius, wat een succes bleek. De ontwikkelingen in batterijtechnologie zorgden ervoor dat in 2006 het eerste elektrische voertuig werd aangekondigd dat gebruikmaakte van een Li-Ion batterij en dat per lading meer dan 300km kon rijden, de Tesla Roadster. De auto bleek een succes en er werden tot 2012 enkele duizenden modellen geleverd. In de jaren die volgden betraden steeds meer autofabrikanten de elektrische markt, zoals Nissan, Renault, Smart, Volvo en Ford. Vanaf ongeveer 2010 steeg de keuze voor consumenten, de actieradius nam toe, de productie werd goedkoper en de markt voor volledig elektrische auto's begon substantiële vormen aan te nemen (Department of Energy, 2014).

Elektrische voertuigen

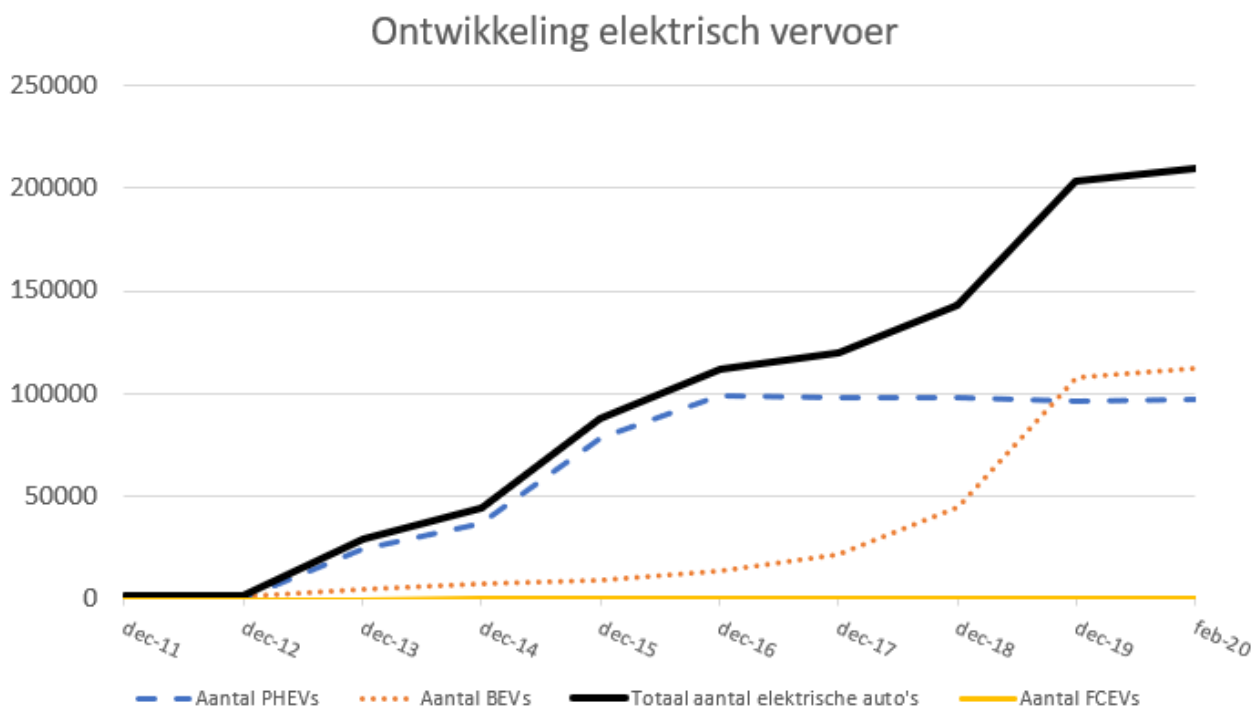
De term 'elektrisch voertuig' wordt vaak toegepast voor verschillende technologieën. De basis ligt echter bij een elektromotor. Deze vervangt de verbrandingsmotor in conventionele voertuigen en stoot

bijvoorbeeld geen schadelijke emissies uit. Een elektromotor zet elektrische energie om in mechanische energie, wat zorgt voor de aandrijving van het voertuig. De manier waarop de elektromotor wordt voorzien van elektrische energie verschilt per model. Een plug-in hybride elektrisch voertuig (PHEV) bestaat uit zowel een elektromotor als een verbrandingsmotor. De elektromotor wordt voorzien door een batterij en deze kan via een stekker en via remenergie worden opgeladen. Een PHEV wisselt automatisch tussen motoren, waar de elektromotor voornamelijk wordt gebruikt bij optrekken en lage snelheden, en de verbrandingsmotor bij constant rijden op hoge snelheden. Door de combinatie van beide motoren kan een relatief hoog bereik worden behaald, echter stoot een PHEV wel nog schadelijke emissies uit door het gebruik van de verbrandingsmotor (Nederland Elektrisch, 2019b). Een andere techniek is het elektrisch voertuig met *range extender* (EREV). Deze beschikt ook over een elektromotor met batterij en een verbrandingsmotor. Echter wordt bij een EREV de verbrandingsmotor gebruikt om via een generator de batterij op te laden, waardoor de aandrijving altijd elektrisch is. Het voertuig met brandstofcel (FCEV) is nog een alternatief. Deze bevat ook een elektromotor, maar geen verbrandingsmotor en geen batterij. De elektrische energie wordt bij een FCEV geleverd door de brandstofcel, welke wordt voorzien van waterstof wat is opgeslagen in een tank in het voertuig. Tegenwoordig wordt de term elektrisch voertuig voornamelijk gebruikt voor een volledig elektrisch voertuig, ook wel batterij-elektrisch voertuig (BEV) genoemd. Een BEV heeft alleen een elektromotor, welke wordt voorzien van elektrische energie door een batterij. De batterij kan worden opgeladen via een stekker bij publieke of privé laadpunten (EV Database, 2019a). Zowel een FCEV als een BEV stoten geen schadelijke emissies uit tijdens het rijden. Hybrides zoals PHEVS en EREVs doen dit wel aangezien deze varianten beschikken over een verbrandingsmotor. In dit onderzoek ligt de focus alleen op BEVs. Dit omdat hybrides overgangsmodellen betreffen en sinds 2017 aan het afnemen zijn in Nederland en omdat FCEVs nog nauwelijks voorkomen (RVO, 2020).

De adoptie van elektrische voertuigen in Nederland kwam rond 2010 op gang met enkele honderden volledig elektrische modellen. Plug-in hybrides werden in 2011 geïntroduceerd en namen van 2012 tot 2016 snel toe tot bijna 100.000 voertuigen. In 2017 vlakte deze groei van PHEVs echter af door wijzigingen in de bijtellingsregels en begon het aantal hybrides licht te dalen. De eerste waterstofauto werd in Nederland geïntroduceerd in 2014 en in de jaren daarna groeide het aantal FCEVs lichtjes (EVConsult, 2019). Momenteel zijn er nog geen 200 waterstofauto's in Nederland (RVO, 2020). Het aantal volledig elektrische voertuigen groeit echter gestaag door sinds de introductie in 2010. In 2016 werd de grens van 10.000 voertuigen doorbroken en in 2018 vond meer dan een verdubbeling plaats. Op het moment van schrijven zijn er ruim 110.000 batterij-elektrische voertuigen in Nederland (RVO, 2020). Internationaal gezien is Nederland een grote speler op het gebied van elektrisch vervoer. Het staat in de top vijf van landen in de wereld waar elektrische personenauto's meer dan 1% van de voertuigvloot uitmaken (RVO, 2020). Zie tabel 1 en grafiek 4.

Tabel 1: adoptiecijfers elektrische voertuigen Nederland (RVO, 2020)

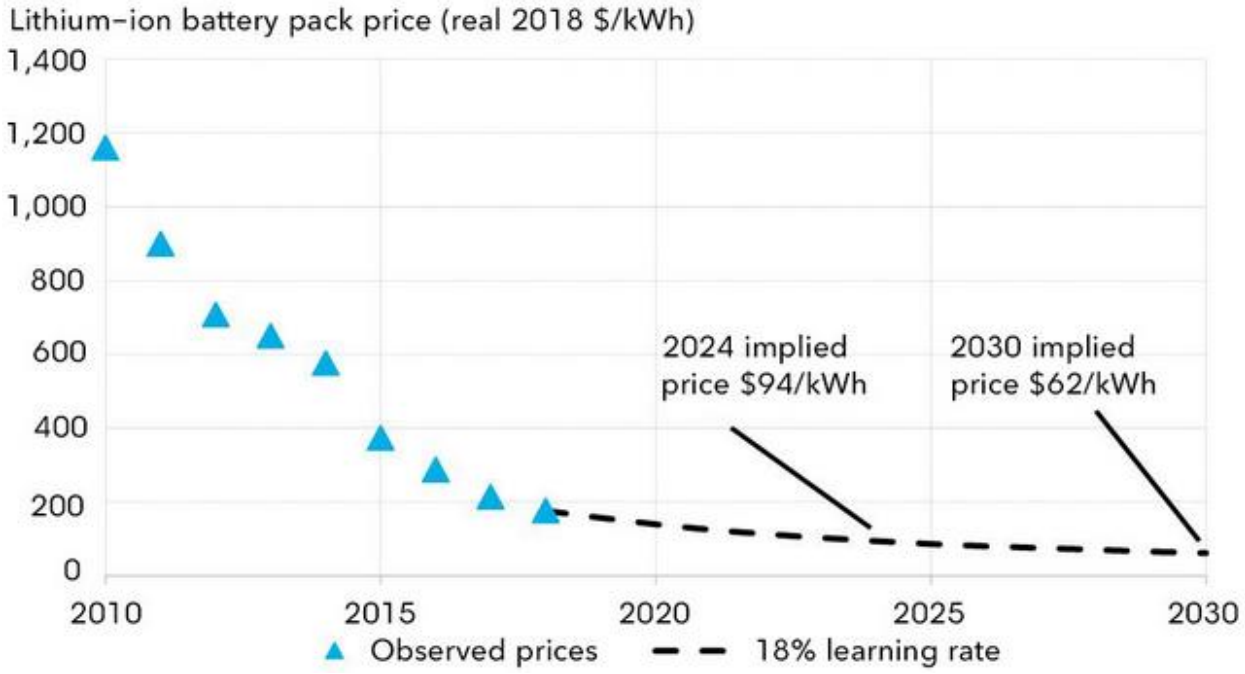
	31-12-2017	31-12-2018	31-12-2019	29-02-2020
Aantal BEVs	21.115	44.984	107.536	112.269
Aantal PHEVs	98.217	97.702	95.885	96.737
Aantal FCEVs	41	50	215	233
Totaal aantal EVs	119.332	142.686	203.636	209.239



Grafiek 4 (RVO, 2020)

Vanaf 2010 is de verscheidenheid aan beschikbare elektrische modellen in Nederland toegenomen. De eerste volledige elektrische auto's in Nederland waren voornamelijk relatief goedkope en kleine stadsauto's met een laag bereik en kleine batterij (16kWh), zoals de Misubishi i-MiEV, de Peugeot Ion en de Citroën C-Zero. Ook kwam in 2010 de Tesla Roadster op de markt in Nederland, welke een stuk duurder was, maar ook een groter bereik had. Het eerste hatchback model was de Nissan Leaf, met een batterijcapaciteit van minstens 24kWh. In de jaren daarop betraden verschillende autofabrikanten de elektrische markt, zoals Renault, BMW, Volkswagen, Opel en Hyundai. De prijs was vaak echter nog hoog, en de goedkopere modellen hadden kleinere batterijen met een lager bereik. Ook kwamen er meer modellen uit in het duurdere segment met hogere batterijcapaciteiten tot wel 100kWh van Tesla, Audi en Jaguar. De meest voorkomende elektrische modellen in een lagere prijsklasse zijn modellen zoals de Renault Zoë, de Volkswagen e-Golf en de Hyundai Ioniq met batterijcapaciteiten tussen de 22 en 40 kWh (Autoweek, 2019). De meest voorkomende elektrische modellen in Nederland zijn momenteel de Tesla Model 3 en S, gevolgd door de Nissan LEAF, Volkswagen e-Golf, BMW i3 en de Renault Zoë (RVO, 2020). Zie tabel 2 voor een overzicht van elektrische modellen in Nederland. Te zien is dat er steeds meer modellen aankomen van ongeveer 30.000 euro of minder met een groter wordend bereik. Voor de toekomst staan er veel nieuwe elektrische modellen gepland, voornamelijk in het goedkopere segment van de markt aangezien hier nog een grote slag geslagen kan worden betreft de adoptie. Er zijn modellen aangekondigd van Skoda, Kia en SEAT. Daarnaast komen er ook vernieuwde en betaalbaardere modellen uit van Volkswagen, Opel en Peugeot (NU.nl, 2019; RVO, 2020). Deze ontwikkelingen kunnen duiden op een aanstaande versnelde shift naar elektrisch vervoer, zeker als gekeken wordt naar twee bepalende factoren in de ontwikkeling van volledig elektrische voertuigen en hun prijs; batterijkosten per kWh en de efficiëntie van een elektrisch model in kWh per kilometer.

De batterij is altijd een hoge kostencomponent geweest voor volledig elektrische voertuigen. Voor meerdere jaren bedroeg deze meer dan de helft van de totale kosten. Dit aandeel is echter dalende en momenteel zorgt de batterij voor gemiddeld een derde van de kosten van het totale voertuig. Daarnaast is ook de verwachting dat de andere kostencomponenten zullen dalen door de te verwachten schaalvoordelen als productievolumes toenemen de komende jaren. Het gaar hier dan om kosten zoals het chassis, de aandrijflijn en de elektromotor (Bloomberg, 2019). Waar de kosten van de batterij in 2010 nog gemiddeld 1160 $/kWh bedroegen, is dit in 2018 gedaald tot 176 $/kWh. Uit de data is een gemiddelde prijsdaling van 18% per verdubbeling van het cumulatieve productievolume te observeren. Hierdoor is de verwachting dat de kosten zullen blijven dalen en dat deze in 2030 62 $/kWh bedragen (BloombergNEF, 2019). Tot nu toe worden echter lithium-ion batterijen gebruikt in elektrische voertuigen, welke momenteel een energiedichtheid hebben van ongeveer 200 Wh per kilogram. In de toekomst kan mogelijk een nieuw batterijtype geïntroduceerd worden; *solid-state* batterijen. Deze kunnen een energiedichtheid halen die twee of drie keer zo groot is als lithium-ion batterijen, echter is dit type batterij momenteel nog in de ontwikkelingsfase (IEA, 2019).



Grafiek 5: Li-ion batterij gemiddelde kosten (BloombergNEF, 2019)

De andere belangrijke factor is de efficiëntie van een elektrisch voertuig, uitgedrukt in kWh per kilometer. Deze wordt beïnvloed door externe en interne factoren. De externe invloed hangt af van de omgeving waarin het elektrisch voertuig rijdt. Bij koude temperaturen levert een batterij door een hogere elektrische weerstand namelijk minder energie dan normaal, wat zorgt voor een lager bereik in kilometer. Ook wordt het bereik minder als de verwarming of de airco aanstaat, en als met hoge snelheid over de snelweg wordt gereden in tegenstelling tot start-stop verkeer in de stad (EV Database, 2017). Deze factoren zijn echter niet te beïnvloeden door autofabrikanten, zij moeten zich richten op interne factoren om meer bereik uit dezelfde batterijcapaciteit te realiseren. Het gaat hier dan om een beter ontwerp van de auto, de aandrijflijn en de batterij, wat te maken heeft met zaken als aerodynamica, stroommanagement en gewicht (Cleantechnica, 2019; InsideEVs, 2018).

Tabel 2: Meest voorkomende BEV modellen Nederland (Autoweek, 2019; EV-database, 2019; RVO, 2020)

Model	Jaar	Min. capaciteit (kWh)	Bereik NEDC (km)	Efficiëntie (kWh/100km)	Prijs vanaf (€)
Mitsubishi i-MiEV Peugeot Ion Citroen C-zero	2010	16	150	12.5	19.990 21.400 21.400
Tesla Roadster	2010	53	393	-	99.260
Nissan Leaf	2010	22	125	17.6	32.590
Nissan Leaf	2013	22	130	16.9	31.590
Renault Zoe	2013	23.3	140	16.6	20.990
BMW i3	2013	18.8	130	14.5	35.500
Tesla Model S	2013	60	345	22	66.200
Volkswagen e-Golf	2014	20.5	130	15.8	36.190
Nissan Leaf	2015	28	170	16.5	33.590
Renault Zoe	2015	23.3	150	15.5	20.990
Tesla Model S	2016	66.5	336	19.8	79.200
Hyundai Ioniq	2016	28	195	14.4	33.995
Tesla Model X	2016	60	285	21.1	90.600
Opel Ampera-e	2017	58	345	16.8	46.699
BMW i3	2017	27.2	170	16	40.412
Volkswagen e-Golf	2017	32	190	16.8	33.220
Hyundai Kona	2018	64	400	16	40.715
Audi e-tron	2018	95	-	23.7	70.450
Jaguar I-Pace	2018	84.7	370	22.9	72.475
Tesla Model 3	2019	50	340	14.7	49.999
Renault Zoe	2019	52	320	16.3	33.590
Kia e-Niro	2018	64	375	17.1	43.275
Hyundai Ioniq	2019	38.3	260	14.7	36.067
Volkswagen e-Up	2020	32.3	200	16.2	23.475
Opel Corsa-e	2020	47.5	290	16.4	30.999
Peugeot 2008	2020	47.5	275	17.3	40.930
SEAT Mii Electric	2020	32.3	200	16.2	21.000
Peugeot e-208	2020	47.5	295	16.1	36.250
Mini Electric	2020	28.9	180	16.1	34.900
Mazda MX-30	2020	32	180	17.8	33.990
Volkswagen ID.3	2020	45	275	16.4	30.000

Laadinfrastructuur

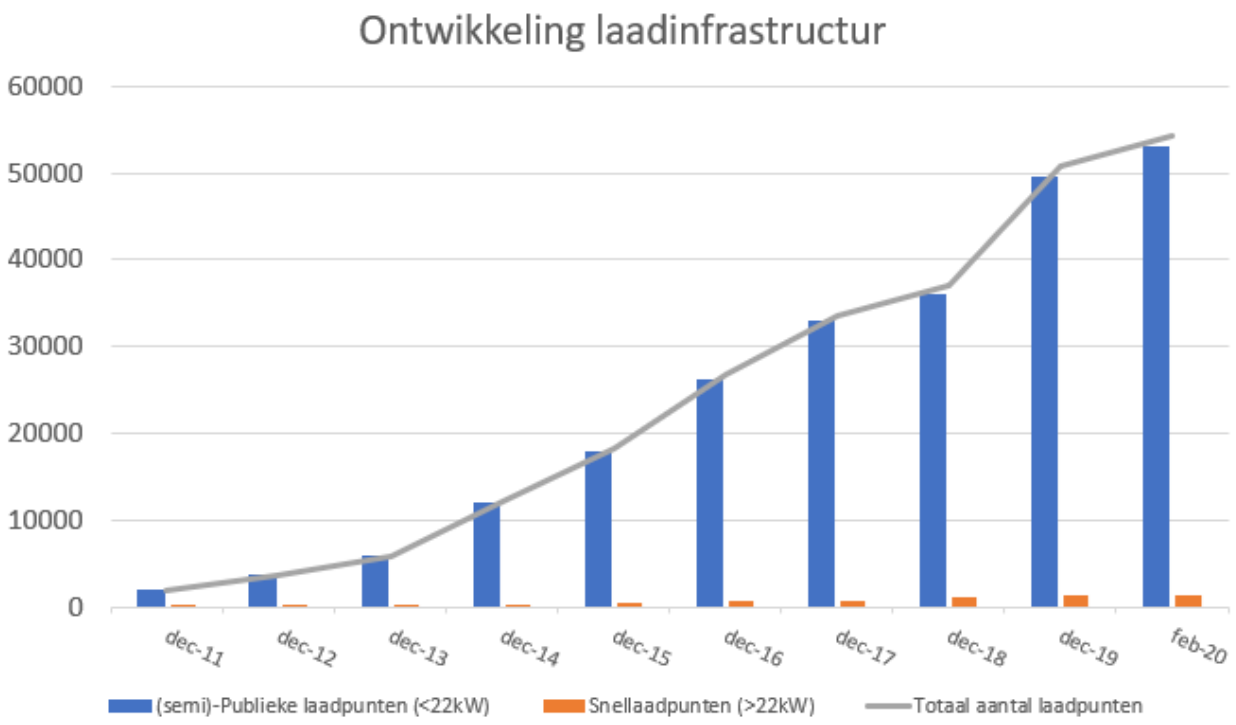
Sinds de introductie van elektrische voertuigen in 2010 is in Nederland ook gestart met realisatie van een publiek laadnetwerk zodat deze voertuigen kunnen worden bijgeladen in het geval er geen privé laadpunt ter beschikking is. Internationaal gezien heeft Nederland de grootste dichtheid aan laadpunten ter wereld (RVO, 2020). Ook onderscheidt het zich doordat er vroeg focus werd gelegd op interoperabiliteit van het laadnetwerk via een samenwerking van laadpaal- en serviceproviders in het opgerichte Centraal Interoperabiliteits Register. In 2012 is hiervoor eViolin opgericht, waar uitbaters van laadpalen samenkomen om ervoor te zorgen dat elk type elektrisch voertuig in Nederland zowel in technische als commerciële zin bij elke laadpuntaanbieder terecht kan (ElaadNL, 2012).

De voortrekkersrol die Nederland heeft op het gebied van laadinfrastructuur is te danken aan de vroege toewijding van stichting e-laad en de betrokkenheid van de overheid bij het aangaan van zogenaamde Green Deals. Stichting e-laad is opgericht in 2009 en was een initiatief van netbeheerders met als doel om 10.000 publieke laadpunten te realiseren. Vijf jaar later waren er 3.000 laadpunten geplaatst, waarna er discussie opkwam of het realiseren van publieke laadpunten wel een taak is voor netbeheerders. De overheid concludeerde in 2013 dat concurrerende activiteiten niet thuishoren in het gereguleerde domein van netbeheerders, waarna de stichting in 2014 opgesplitst werd in twee organisaties op het gebied van laadinfrastructuur; Elaad-NL (opererend als kennis- en innovatiecentrum) en EVnetNL (opererend als onderhoud- en serviceprovider) (Kwink Groep, 2016). In 2011 startte de overheid met de Green Deal aanpak, waarbij afspraken worden gemaakt om duurzame initiatieven te bevorderen. Er werden meerdere Green Deals gesloten ten behoeve van bevordering van de publieke laadinfrastructuur in Nederland (Greendeals, 2019). Hierover wordt verder uitgeweid in het deel 'Beleid'.

Deze ontwikkelingen hebben geleid tot de groei van het publieke laadnetwerk in Nederland vanaf 2010. Binnen dit laadnetwerk wordt onderscheid gemaakt tussen normale 'langzame' laadpunten (<22kW) en snellaadpunten (>22kW). Snellaadpunten zijn voornamelijk gesitueerd langs snelwegen of *Points of* Interest (POIs) en dienen grotendeels om onderweg bij te laden en het bereik te vergroten, ook wel bezoekersladen genoemd. Normale laadpunten zijn bedoeld voor dagelijks autogebruik in het geval er geen mogelijkheid is om thuis in de garage of op de oprit op te laden en zijn voornamelijk gesitueerd in steden, woonwijken of bij werklocaties, ook wel bewonersladen genoemd. Sinds de introductie blijven beide types laadpunten gestaag doorgroeien. Zowel het aantal normale als snelle laadpunten ervaarde een grote groei in 2015 en 2016. In 2018 maakte het aantal snelladers een grote sprong, echter bleef het aantal normale laadpunten enigszins achter. In 2019 geldt het omgekeerde; normale laadpunten namen flink toe, en het aantal snelladers bleef nagenoeg gelijk (RVO, 2020). Zie tabel 3 en grafiek 6.

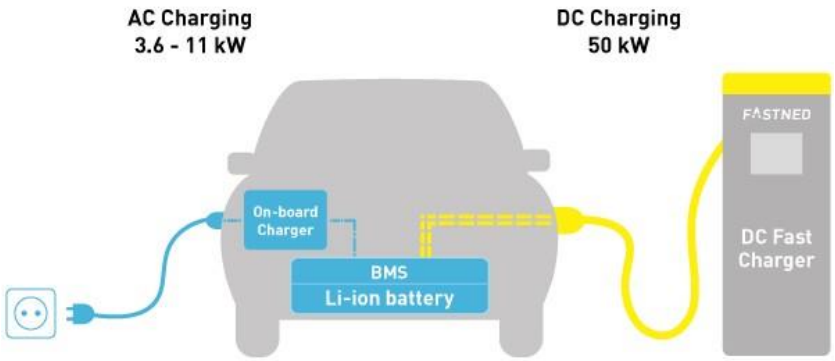
Tabel 3: Cijfers elektrische laadinfrastructuur Nederland (RVO, 2020)

	31-12-2017	31-12-2018	31-12-2019	29-02-2020
Aantal (semi)-publieke laadpunten	32.875	35.861	49.520	53.036
Aantal snellaadpunten	755	1116	1252	1319
Totaal aantal publieke laadpunten	33.630	37.977	50.772	54.355



Grafiek 6 (RVO, 2020)

De snelheid waarmee dit publieke laadnetwerk de batterij in elektrische voertuigen oplaadt varieert per laadpunt en per elektrisch model. Ook hangt het af van de temperatuur en de *state of charge*, aangezien vaak automatisch de laadsnelheid wordt verminderd als de batterij voor 80 tot 90% is opgeladen om oververhitting te voorkomen (Fastned, 2018). Doordat het stroomnetwerk in Nederland wisselstroom levert en een batterij in een elektrisch voertuig gelijkstroom nodig heeft, wordt dit door een omvormer omgezet. Bij normale laadpunten wordt hiervoor gebruik gemaakt van de interne omvormer (ook wel oplader genoemd) in een elektrisch voertuig. De eerste normale laadpunten waren laadpunten met een Type 1 connector welke 1-fase kunnen laden met een vermogen van 3.7 tot 7.4 kW. Deze laadsnelheid wordt bepaald door de netspanning van 230V in Nederland en door de gangbare stroomsterkte van 16A, wat neerkomt op een laadvermogen van 3.680 Watt. Sommige laadpunten maken gebruik van een verdubbelde stroomsterkte van 32A, wat zorgt voor een laadvermogen van 7.360 Watt. Door gebruik te maken van een 3-fasen groepenkast met 32A worden deze laadvermogens verdriedubbeld naar 11 en 22 kW, wat momenteel het meeste voorkomt bij normale publieke laadpunten in Nederland (Oplaadpunten.nl, 2019). Voor een gemiddelde elektrische auto houdt een laadvermogen van 11kW in dat er ongeveer 70 km bereik per uur wordt bijgeladen. Voor 22kW wordt



Figuur 6: laden met wisselstroom en gelijkstroom (Fastned, 2018)

dit verdubbeld naar 140 km bereik per uur opladen, wat ruim voldoende is als een elektrische auto een nacht of werkdag kan opladen. Bij deze snelheden wordt de Type 2 connector gebruikt, ook wel Mennekes genoemd. Deze werd in 2013 door de Europese Commissie vastgesteld als standaard laadadapter in de EU en wordt gebruikt bij normale laders en snelladers tot 43kW (EV Database, 2019b).

Snellaadpunten gebruiken een externe omvormer om wisselstroom om te zetten in gelijkstroom, waarna de elektriciteit direct aan de batterij kan worden geleverd. Hierdoor zijn hogere laadvermogens haalbaar. Naast een Type 2 lader van maximaal 43 kW wordt in Nederland voornamelijk gebruikt gemaakt van CCS (*Combined Charging System*) en CHAdeMO laders. Deze halen beiden een laadvermogen van 50kW. CCS wordt ook wel Combo genoemd doordat deze gebruik maakt van Type 1 en 2 connectoren (EV Database, 2019b). Ook zijn er nog enkele snellaadpunten van Tesla met een laadvermogen van 120kW. Tesla heeft echter aangekondigd dat het zijn laadpunten in Europa ook gaat voorzien van een CCS aansluiting (Engadget, 2018). Zie tabel 4 voor een overzicht van laadtypes en snelheden.

Hogere laadsnelheden worden echter al geïntroduceerd en aangekondigd. In 2018 opende Fastned in Nederland de eerste snellader met een laadvermogen van 350kW (Tweakers, 2018b). Ook zijn snellaadprotocollen aangekondigd en demonstraties vertoond van laadvermogens boven de 400kW, echter zijn deze snelheden niet geschikt voor de huidige elektrische modellen en is dit voornamelijk bedoeld voor toekomstige elektrische auto's (CHAdeMo, 2018; Tweakers, 2018a).

Tabel 4: Overzicht laadtypes en vermogens (EV Database, 2019)

Type laadpunt	Laadmethode	Laadvermogen
Type 1	1-fase 16A of 32A	3.7 kW – 7.4 kW
Type 2 'Mennekes'	1-fase 16A of 32A	3.7 kW – 7.4 kW
Type 2 'Mennekes'	3-fase 16A of 32A	11 kW – 22 kW
Type 2 'Mennekes'	3-fase 64A	43 kW
CHAdeMO	DC	50 kW
CCS	DC	50 kW
Tesla Supercharger	DC	120 kW

Beleid

Om de transitie naar elektrisch vervoer vorm te geven voert de Nederlandse overheid al geruime tijd beleid. In 2009 presenteerden de toenmalige ministers van Verkeer & Waterstaat en Economische Zaken een brief aan de Tweede Kamer waarin zij een plan van aanpak presenteerden rondom beleid van elektrisch vervoer. Dit plan moest inhoud en vorm geven aan de ondersteunende rol van de overheid. In elektrisch vervoer werden kansen gezien om automobiliteit te verduurzamen, klimaatverandering tegen te gaan, luchtkwaliteit te verbeteren en geluidsvervuiling te verminderen. Daarnaast werden er mogelijkheden gezien om de energiepositie van Nederland te versterken door middel van vermindering van afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en olieproducerende landen. Ook zag men kansen om de toentertijd neergaande economische situatie te versterken en het vestigingsklimaat en de werkgelegenheid te verbeteren. Alhoewel Nederland geen auto-industrie kent, zijn er wel internationaal toonaangevende toeleveranciers, kennis-, onderzoek- en ontwikkelinstellingen waarvoor elektrisch rijden nieuwe kansen biedt. De ambitie was om Nederland in de periode na 2009 te ontwikkelen tot gidsland en internationale proeftuin voor elektrisch rijden. Het kabinet wilde kansrijke marktinitiatieven ondersteunen en zo marktintroductie versnellen via samenwerking tussen marktpartijen,

maatschappelijke organisaties, kennisinstellingen en de verschillende overheidslagen. In dit plan van aanpak werd toentertijd gefocust op drie hoofdlijnen, welke ondersteund zouden worden met een bijdrage van maximaal 65 miljoen euro (Eurlings & van der Hoeven, 2009).

1. Het oprichten van een zogenaamd Formule E team, wat een publiek-private samenwerking is tussen verschillende partijen en stichtingen, zoals de ANWB, de RAI-vereniging of ElaadNL. De kernopdracht van dit team is het aanjagen van marktontwikkeling, het wegnemen van belemmeringen en om in het algemeen ontwikkelingen rond elektrisch vervoer te bevorderen. Meer specifiek kan dit bijvoorbeeld gaan om het ondersteunen van de uitrol van de laadinfrastructuur, ontwikkelen van de consumentenmarkt of het gericht ondersteunen van het bedrijfsleven.
2. Concrete rijksmaatregelen op fronten als praktijkproeven, *launching customership*, laad- en energie infrastructuur, onderzoek en ontwikkeling van elektrische voertuigen en hun componenten of consortium- en coalitievorming.
3. Het borgen van een gecoördineerde en gefaseerde programmatische benadering van de marktintroductie van elektrisch vervoer door het Formule E team om ervoor te zorgen dat bij elke stap de juiste opties worden uitgevoerd om zo lang mogelijk flexibiliteit te behouden.

In 2011 presenteerde de overheid het plan van aanpak Elektrisch rijden in de versnelling (2011-2015). Hierin werd geconcludeerd dat er sinds het eerste beleidsplan in 2009 goede stappen zijn gezet, waarin in dit plan op werd voortgeborduurd. Bij het stimuleren van elektrisch vervoer waren de eerste stappen gezet via onder andere proeftuinen, verkennend onderzoek, ontwikkeling van een marktmodel voor laaddienstverlening en fiscale voordelen. In dit plan uit 2011 waren ook nog steeds de drie voornaamste redenen om elektrisch vervoer te bespoedigen van toepassing; economieversterking, energieonafhankelijkheid en milieuverbetering door tegengaan van klimaatverandering en verminderen van luchtvervuiling. Daarnaast werden er doelen gesteld over de adoptie van elektrische auto's; in 2020 zouden er 200.000 elektrische voertuigen moeten zijn (BEV en PHEV), wat in 2025 gegroeid moet zijn tot een miljoen. Om deze doelen te halen zijn er drie speerpunten gekozen, welke ondersteund werden door een generiek beleidspakket. Het eerste speerpunt draaide om focusgebieden, waarmee werd bedoeld dat er gericht werd op bepaalde gebieden waar de baten van elektrisch rijden het grootste zijn; voornamelijk in de grotere stedelijke gebieden. Per gebied was het de bedoeling om een specifiek pakket van maatregelen of projecten te ontwikkelen in samenwerking met lokale partijen, wat leidt tot kennisdeling naar de rest van Nederland. Het tweede speerpunt focuste zich op kansrijke segmenten en om daarvoor een businesscase te ontwikkelen en belemmeringen weg te nemen door bijvoorbeeld vergunningen te verlenen voor installatie van snelladers langs snelwegen. Ook ging het om segmenten waar veel voertuigbewegingen en voertuigkilometers gemaakt werden, zoals logistiek, zakelijke mobiliteit, collectief vervoer en bedrijfs- en overheidsvoertuigen. Het derde speerpunt bedroeg het stimuleren van verdienpotentieel van het Nederlands bedrijfsleven via duurzame economische groei door het versterken van de concurrentiepositie, verbeteren van de werkgelegenheid en vermeerderen van de omzet. Het gaat hier dan om stimulering en facilitering van het bedrijfsleven op vlakken als; ondersteunen van innovatieve projecten, stimuleren van publiek-private samenwerkingen of bevorderen van de marktontwikkelingen rondom de totstandkoming van laadinfrastructuur (RVO, 2011).

Deze drie speerpunten werden ondersteund door een beleidspakket om de ambities in het plan van aanpak te realiseren. Fiscale maatregelen waren hier een belangrijk onderdeel van. Zo werd er geen bijtelling gerekend voor zakelijke elektrische auto's met een maximale uitstoot van 50 gram CO_2 per

kilometer, wat toepasbaar is op volledig elektrische auto's en zuinige plug-in hybrides. Ook werd er voor dit type voertuigen geen motorrijtuigenbelasting gerekend en bleef de belasting bij de aanschaf vrijgesteld. Een ander onderdeel ging om het stimuleren van laadinfrastructuur, om zo een markt van laden en betalen te laten ontstaan. In die tijd was er nog geen rendabele businesscase te maken voor een publieke laadpaal, waardoor deze ontwikkeling ondersteund werd vanuit de overheid. Aandacht werd vooral geschonken aan uitrol van de laadinfrastructuur in focusgebieden en aan de ontwikkeling op publiek terrein omdat 70% van de Nederlanders niet beschikt over privaat terrein maar wel voornamelijk thuis of op het werk wilt opladen. Ook lag er focus op het stimuleren van innovatieve technieken zoals snelladen, inductieladen of *smart-charging* om de netbelasting beter te verdelen. Nog een onderdeel binnen dit beleidspakket richtte zich op het borgen van de veiligheid rond elektrische voertuigen. Door de nieuwe elektrische aandrijflijn was er vernieuwde regelgeving nodig rondom veiligheidskeuringen. Ook lag er focus op incidentmanagement bij ongevallen met elektrische voertuigen en op het opleiden van gekwalificeerde monteurs en technici. Beleid richtte zich ook op de overheid als *lead customer*, door middel van participatie in proeftuinen of verduurzaming van de bedrijfsvoering van de overheid via bijvoorbeeld het aanleggen van laadpunten bij overheidsgebouwen, het ondersteunen van onderzoek binnen elektrisch vervoer en het aansturen van internationale samenwerking. Om deze plannen uit te voeren werd in 2011, naast de fiscale voordelen, negen miljoen euro beschikbaar gesteld. Dit bedrag werd over vijf jaar verdeeld per beleidsonderdeel (RVO, 2011).

In 2011 is de Nederlandse overheid ook begonnen met de zogenaamde Green Deal aanpak, waarbij de overheid afspraken maakt met bedrijven, maatschappelijke organisaties of andere overheden met als doel duurzame plannen tot uitvoer te brengen. Hierbij helpt de overheid door middel van het aanpassen van wet- en regelgeving, door op te treden als bemiddelaar of door bedrijven te ondersteunen met het betreden van nieuwe markten met een duurzame technologie. Green Deals zijn gesloten in sectoren als energie, water, grondstoffen, biodiversiteit, de bouw, voedsel en mobiliteit (Rijksoverheid, 2011). De eerste Green Deal op het gebied van elektrisch vervoer werd gesloten in 2011. Hier waren veel verschillende marktspelers bij betrokken, van universiteiten tot automotive verenigingen en van een leasemaatschappij tot laadpuntbeheerders. Belangrijke doelstellingen binnen deze Green Deal waren het voortzetten van de voortrekkerstol van het Formule-E team, opzetten van een taskforce om de uitrol van 15.000 tot 20.000 elektrische auto's te realiseren, ontwikkeling van de focusgebieden elektrisch rijden, de realisatie van een publiek laadnetwerk van 20.000 normale laadpunten en 100 snelladers en het gericht ontwikkelen van kansrijke marktsegmenten zoals nul-emissie openbaar vervoer, stadsdistributie, bezorgscooters en vaartuigen (Green Deals, 2011a).

In 2011 werd ook een tweede Green Deal afgesloten rondom elektrisch vervoer, deze was echter meer gericht op de laadinfrastructuur. Zowel autofabrikanten, laadpuntbedrijven en stichting e-laad waren betrokken bij deze Green Deal, welke als voornaamste doel had om 10.000 intelligente laadpunten te realiseren in 2012 en 2013. De focus lag hier ook op intelligent laden, waarmee wordt bedoeld dat de vraag en aanbod van elektriciteit beter op elkaar wordt afgestemd en dat deze laadpunten voorzien worden van *smart-grid* technologie waarmee een elektrische auto ook terug kan leveren aan het elektriciteitsnet (Green Deals, 2011b).

Vier jaar later werd nog een specifieke Green Deal ten behoeve van de publieke laadinfrastructuur gesloten. Het voornaamste doel van deze deal bedroeg het rendabel maken van laadinfrastructuur voor commerciële exploitatie. Om dit doel te bereiken werd ingezet op beperking van kosten, stimuleren van innovatie en aanpassing van wetgeving om belemmeringen weg te nemen. De overheid stelde een

financiële stimulering ter beschikking van 7,2 miljoen euro voor een periode van drie jaar. Dit bedrag werd gebruikt om per laadpaal een bijdrage te leveren aan gemeenten en laadpaalexploitanten en heeft gezorgd voor de realisatie van ruim 11.000 laadpunten. Daarnaast werd ingezet op innovatie door via het Nationaal Kennisplatform Laadinfrastructuur te bereiken dat publiek laden goedkoper werd en om voor een sluitende businesscase te zorgen. Dit werd gedaan door te focussen op kennisontwikkeling, ketenoptimalisatie, standaardisatie en slimladen (Green Deals, 2015).

In 2016 werd nog een Green Deal afgesloten als vervolg op de eerste Green Deal uit 2011. Hierin werd geconcludeerd dat Nederland een van de koplopers op het gebied van elektrisch vervoer was geworden en dat de doelstellingen uit de eerste Green Deal ruimschoots waren behaald. Dit kwam ten goede aan de werkgelegenheid binnen de sector, met een vervijfvoudiging van het aantal banen. Het doel van deze Green Deal van 2016-2020 was het bundelen van alle acties binnen elektrisch vervoer zodat het een stevig fundament krijgt en dat er geen verdere overheidsondersteuning nodig gaat zijn in 2020. Om dit te bereiken werd ingezet op het verder ontwikkelen van de consumentenmarkt, het verbeteren en verruimen van de laadinfrastructuur, het initiëren van living labs voor slim laden en het verbeteren van *smart-grids* waardoor elektrische voertuigen gebruikt kunnen worden als opslag van de variabele inzet van duurzame energie. Hiervoor zijn werkgroepen opgezet waarin de verschillende betrokken partijen worden verbonden. Binnen deze deal was de ambitie dat er in 2020 75.000 elektrisch aangedreven voertuigen rijden in Nederland, en dat dan 10% van de nieuw verkochte personenauto's elektrisch is (zowel BEV als PHEV). In 2025 moet dit 50% zijn voor zowel BEVs als PHEVs en hiervan moeten minimaal 30% BEV registraties zijn (Green Deals, 2016).

Er kan geconcludeerd worden dat dit beleid tot nu toe succesvol is geweest. De doelstelling van 75.000 elektrische aangedreven voertuigen in 2020 is ruim gehaald en ook is het percentage nieuwe registraties op de goede weg; in oktober 2019 was 8,2% van alle nieuwe voertuigen in Nederland elektrisch aangedreven (Nederland Elektrisch, 2019a). Ook uit een evaluatie in 2016 van het plan van aanpak Elektrisch Rijden in de Versnelling blijkt dat de uitrol van elektrisch vervoer in Nederland succesvol is geweest. De werkgelegenheid nam toe, interoperabiliteit werd breder vertegenwoordigd in het laadnetwerk, het aantal snelladers groeide en slim laden en *smart-grids* zijn verder tot ontwikkeling gekomen. Voornamelijk is dit te danken aan het gevoerde financiële beleid, maar ook aan inspanningen van het Formule-E team. Aandachtspunten voor toekomstige beleidsvoering kunnen liggen bij het verder focussen op wegnemen van belemmeringen in wetgeving, het realiseren van de elektrische tweedehandsmarkt en het versterken van internationaal verdienpotentieel (Kwink Groep, 2016).

Vanaf 2015 kwam er meer focus te liggen op het tegengaan van klimaatverandering toen Nederland zich aansloot bij het Internationaal Klimaatakkoord van Parijs, waarbij doelen werden gesteld om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. In de jaren daarna werd gewerkt aan plannen om de energiesector te verduurzamen en in 2018 werd de Klimaatwet in Nederland aangenomen. Hierin is vastgelegd dat in 2030 49% minder CO_2 moet worden uitgestoten dan in 1990. Voor 2050 moet die vermindering 95% zijn. Om dit doel te halen is er door de overheid, het bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties een Klimaatakkoord gesloten, wat maatregelen bevat om de uitstoot te beperken. Eind 2018 was het ontwerp Klimaatakkoord klaar, wat een omvangrijk pakket aan maatregelen bevatte. In de zomer van 2019 werd het volledige Klimaatakkoord gepresenteerd en startte de uitvoering (Rijksoverheid, 2019b). De maatregelen binnen het Klimaatakkoord zijn breed van toepassing op verschillende sectoren, zoals energie, industrie, gebouwde omgeving, landbouw en mobiliteit. Het gaat hierbij onder andere over meer elektriciteit uit hernieuwbare bronnen zoals wind- en zonne-energie. Ook moeten meer woningen

verduurzaamd worden en van het aardgas af. De industrie moet circulair worden en veel minder CO_2 uit gaan stoten. De landbouw moet klimaatneutraal worden en ook de voedselproductie en -consumptie moet verduurzamen (Klimaatakkoord, 2019b).

Voor de sector mobiliteit ligt de focus op slimmer en schoner vervoer, oftewel geen emissies en goede bereikbaarheid voor iedereen. Mobiliteit moet betaalbaar, veilig en makkelijk worden. Steden worden slim, duurzaam en compact met optimale doorstroming. Hier wordt op ingezet door een integrale aanpak van het mobiliteitssysteem met een scala aan maatregelen. Er wordt bijvoorbeeld gekeken naar een andere bekostigingssystematiek, oftewel rekeningrijden. Betalen naar gebruik moet het uitgangspunt worden en valt in 2025 samen met een geplande belastingherziening. Er wordt bekeken welke vorm van rekeningrijden exact gaat gelden. Varianten die onderzocht worden zijn beprijzen per kilometer bij alleen elektrische auto's en geen verandering voor fossiele auto's, een tijd- en plaatsgebonden heffing per kilometer voor het hele wagenpark of een emissie-, tijd- en plaatsgebonden heffing per kilometer voor het hele wagenpark. Dit is een voorbeeld van een maatregel die moet leiden tot gedragsverandering en minder kilometers, meer deelauto's en meer fietsen en openbaar vervoer. Verder staat centraal dat duurzame energiedragers voor alle modaliteiten de standaard moeten worden. Er wordt ingezet op batterij-elektrisch, groene waterstof, zonne-energie en duurzame biobrandstoffen. De prioriteit ligt echter bij elektrificeren en de hoop is dat elektrificatie van het vervoersysteem zich versnelt de komende jaren waardoor emissiereducties gerealiseerd worden. Binnen de mobiliteitssector is de logistiek een belangrijke bron van CO_2 uitstoot. Ook deze sector moet emissieloos worden voor 2030, gericht op voertuigen zoals bouwverkeer, bestelbusjes en mobiele werktuigen. Daarnaast verduurzaamt de sector door ketenoptimalisatie en door optimale bevoorrading in logistieke hubs buiten de stad. Ook zeevaart en luchtvaart moeten gaan verduurzamen. Voor de scheepvaartsector wordt via een Green Deal samengewerkt om 40% minder CO_2 uitstoot te realiseren in 2030. Een andere maatregel is gericht op emissiezones in steden, waar lopen, fietsen en openbaar vervoer voorrang krijgen. Hiervan gaan er steeds meer gerealiseerd worden de komende jaren, waarna deze in 2025 ook moeten gaan gelden voor goederenvervoer. Openbaar vervoer in steden wordt ook emissieloos voor 2030, bussen moeten dan bijvoorbeeld 100% emissieloos zijn (Rijksoverheid, 2019a).

Voor personenvervoer gelden ook doelstellingen wat betreft elektrificatie. Vanaf 2030 moeten alle nieuw verkochte auto's emissieloos zijn, en dus elektrisch aangedreven. In aantallen komt dit neer op circa twee miljoen elektrisch aangedreven personenvoertuigen (Rijksoverheid, 2018). Dit kunnen zowel batterij-elektrische als waterstof auto's zijn (BEV en FCEV). Echter ligt voor personenvervoer de focus op batterij-elektrisch. In waterstof wordt een rol gezien voor zwaar transport, openbaar vervoer of als energiedrager voor duurzaam opgewekte energie. Het zakelijke personenvervoer zorgt voor meer dan de helft van de wegkilometers, waardoor werkgevers ook een rol hebben in het verduurzamen van de mobiliteit. Er wordt gericht op acht miljard minder zakelijke autokilometers in 2030 ten behoeve van vermindering van CO_2 uitstoot. Dit moet bereikt worden door werkgevers te stimuleren om *best practices* te realiseren binnen hun organisatie. Het gaat hier dan om stimuleren van maatregelen zoals flexibel werken door middel van spitsmijden, thuiswerken of video-*conferencing*. Ook gaat het om hanteren van parkeerbeleid bij werknemers die niet anders kunnen reizen, overstappen naar volledig elektrische auto's van de zaak, invoeren van een mobiliteitsbudget waar schoon reisgedrag wordt beloond, verstrekken van OV-abonnementen voor werknemers of het stimuleren van trein- in plaats van vliegreizen. Daarnaast wordt er gericht op betere fietssnelwegen, vergemakkelijken van autodelen en combineren van mobiliteitsvormen om een zakelijke modal shift te realiseren (Rijksoverheid, 2019a).

Andere maatregelen betreffende elektrificatie van personenvervoer houden zich bezig met normering, flankerend beleid, fiscale stimulering en de versnelde uitrol van laadinfrastructuur. Nederland zet zich in om elektrische voertuigen de norm te maken. Dit heeft niet alleen betrekking op inzetten voor striktere CO_2 normen op Europees niveau, maar ook op het stimuleren en normeren van elektrisch vervoer in de samenleving en alle overheidslagen, zoals verduurzaming van het Rijkswagenpark, aanbestedingen doen aan bedrijven die hun wagenpark hebben verduurzaamd en informatievoorziening richting de consument over prijsverschillen tussen fossiele en schone brandstoffen. Ook zijn flankerende maatregelen nodig om de systeemtransitie naar elektrisch vervoer te realiseren. Het gaat hier dan om zaken als communicatie, voorlichting en opleiding rondom elektrisch vervoer, het Europeesrechtelijk afdwingen om voor de consument inzicht te verkrijgen in de levensduur van een batterij en hier een garantietermijn aan te verbinden, het optimaliseren van elektrificatie in de lease, het versnellen en stimuleren van elektrisch autodelen en het helpen ontwikkelen van de elektrische tweedehandsmarkt, bijvoorbeeld via het beperken van export op gesubsidieerde elektrische auto's (Klimaatakkoord, 2019b).

Fiscale stimulering is misschien wel het belangrijkste aspect om elektrisch personenvervoer te stimuleren. Het huidige systeem van autobelasting is een mix van belasten van bezit en belasten naar gebruik via accijns op fossiele brandstoffen. Omdat elektrisch rijden groeiende is, is op termijn een andere vorm van autobelasting gewenst om te voorkomen dat een kleiner wordende groep de belastinginkomsten opbrengt. Onder dit nieuwe stelsel moet iedere automobilist gaan betalen naar gebruik om minder uitstoot en files te bewerkstelligen. Tot minimaal 2025 zal echter nog het huidige systeem worden gehandhaafd, zij het met aanpassingen om elektrisch vervoer te stimuleren om de doelstelling van twee miljoen elektrische auto's in 2030 te realiseren. Hiervoor worden verschillende maatregelen genomen (Rijksoverheid, 2019a). Sinds de jaren '90 geldt al een vrijstelling voor auto's met een elektrische aandrijving voor de Belasting van Personenauto's en Motorrijwielen (BPM), die eenmalig wordt geheven bij de registratie van een nieuwe auto (Belastingdienst, 2014). De motorrijtuigenbelasting (MRB) moet jaarlijks worden betaald. Vanaf 2009 gold een kwarttarief op de MRB voor auto's met lage emissie en vanaf 2010 waren deze vrijgesteld (BEV, PHEV en FCEV) (Autokopen.nl, 2009; Autowereld, 2009). Vanaf 2017 kwam hier verandering in voor PHEVs. Bij een uitstoot tot 50 gram CO_2 per kilometer geldt een halftarief voor de MRB, voor alles hierboven geldt het voltarief. Ook de BPM is niet meer vrijgesteld voor PHEVs vanaf 2017. Hiervoor moet een tarief worden betaald dat afhankelijk is van de uitstoot in gram CO_2 per kilometer. Voor nulemissievoertuigen (BEV en FCEV) geldt in 2020 echter nog steeds een vrijstelling voor zowel de BPM als de MRB (ANWB, 2020).

Bijtelling is een belasting die geldt voor zakelijke rijders die meer dan 500 kilometer per jaar privé rijden. Er wordt een percentage van de catalogusprijs per jaar bij het inkomen opgeteld, waar vervolgens belasting over moet worden betaald. Dit percentage staat vanaf het moment van registratie voor vijf jaar vast. Vanaf 2010 was dit percentage 0% voor voertuigen met een emissie tot 50 gram CO_2 per kilometer (BEV, PHEV en FCEV). In 2014 veranderde dit naar 4% voor nulemissievoertuigen (BEV en FCEV) en 7% voor voertuigen met een emissie van 1 tot 50 gram CO_2 per kilometer (PHEV). Voor deze plug-in hybrides werd dit percentage 15% in 2016 en 22% in 2017, wat gelijk is aan het percentage voor benzineauto's (Riemersma Leasing, 2016). In 2020 is het bijtellingspercentage nog steeds 4% voor nulemissievoertuigen, echter geldt dit alleen voor batterij-elektrische voertuigen tot een waarde van 50.000 euro. Bij duurdere volledig elektrische modellen geldt het standaard percentage van 22%. Voor waterstofauto's (FCEV) geldt deze beperking niet (ANWB, 2020). Zie tabel 5 voor een overzicht van de in 2020 geldende fiscale maatregelen.

Tabel 5: Fiscale maatregelen elektrisch vervoer in 2020

Type stimulering	Autotype	Huidig beleid 2019
Belasting van Personenauto's en Motorrijwielen (BPM)	PHEV	Gereduceerd tarief voor BPM a.d.h.v. uitstoot
	BEV / FCEV	Vrijstelling voor BPM
Motorrijtuigenbelasting (MRB)	PHEV	Halftarief tot 50g/km CO_2 uitstoot
	BEV / FCEV	Vrijstelling voor MRB
Bijtelling leaserijders	PHEV	22%
	BEV	4% tot 50.000 euro, 22% > 50.000 euro
	FCEV	4%

De toekomstige situatie van fiscale stimulering is uitgewerkt in het Klimaatakkoord. Emissieloze auto's (BEV en FCEV) blijven vrijgesteld van BPM tot en met 2024. Vanaf 2025 wordt dit een vast tarief van 360 euro per auto. Ook blijven deze auto's tot en met 2024 vrijgesteld van MRB, in 2025 wordt dit verhoogd tot 25% van het normale tarief en vanaf 2026 is het plan dat het normale tarief gaat gelden. Voor plug-in hybrides blijft het halftarief van de MRB gehandhaafd tot en met 2024. In 2025 wordt de korting 25% en het plan is dat vanaf 2026 ook het normale tarief geldt voor plug-in hybrides (AutoRAI, 2019). Het bijtellingspercentage voor nulemissievoertuigen wordt stapsgewijs opgebouwd voor volledig elektrische voertuigen (BEV), en het maximum van de aanschafprijs wordt afgebouwd tot 40.000 euro. Vanaf 2026 moet ook het normale bijtellingspercentage van 22% gaan gelden voor volledig elektrische voertuigen. Emissieloze voertuigen die zich nog niet in de markt bewezen hebben, zoals waterstofauto's, blijven een laag bijtellingspercentage hanteren zonder maximumaanschafprijs tot 2025. Daarnaast komt er vanaf 1 juli 2020 een aanschafsubsidie voor particuliere emissieloze auto's die vervolgens stapsgewijs wordt afgebouwd tot en met 2025, als er naar verwachting in de loop der jaren steeds meer betaalbare elektrische modellen op de markt komen. De subsidie voor een nieuwe elektrische auto bedraagt 4000 euro in 2020 en 2021 en bouwt af tot 2550 euro in 2025. Ook geldt er een subsidie van 2000 euro voor een tweedehands elektrische auto. Dit bedrag blijft gehandhaafd tot en met 2024. Voorwaardes zijn dat de auto niet duurder mag zijn dan 45.000 euro en deze een bereik van minstens 120km moet hebben. Ook moet de elektrische auto minstens drie jaar op naam van de subsidieontvanger blijven staan (Overheid, 2020). Verder is het plan dat in 2024 een evaluatie wordt uitgevoerd om te bepalen welke maatregelen na 2025 nog nodig en wenselijk zijn om de doelstellingen voor 2030 te halen. Ook vindt er een jaarlijkse ijking van de stimuleringsmaatregelen plaats, om overstimulering te voorkomen als adoptie sneller loopt dan verwacht (Rijksoverheid, 2019a). Zie tabel 6 voor een overzicht van de toekomstige fiscale maatregelen.

Tabel 6: Toekomstige fiscale maatregelen emissieloze auto's

Maatregel	2020	2021	2022	2023	2024	2025	>2025
BPM	0	0	0	0	0	360 euro	360 euro
MRB	0%	0%	0%	0%	0%	25%	100%
Bijtelling	8%	12%	16%	16%	17%	22%	22%
Bijtelling max.	45.000	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000	n.v.t.
Subsidie	4.000	4.000	3.700	3.350	2.950	2.550	n.n.b.

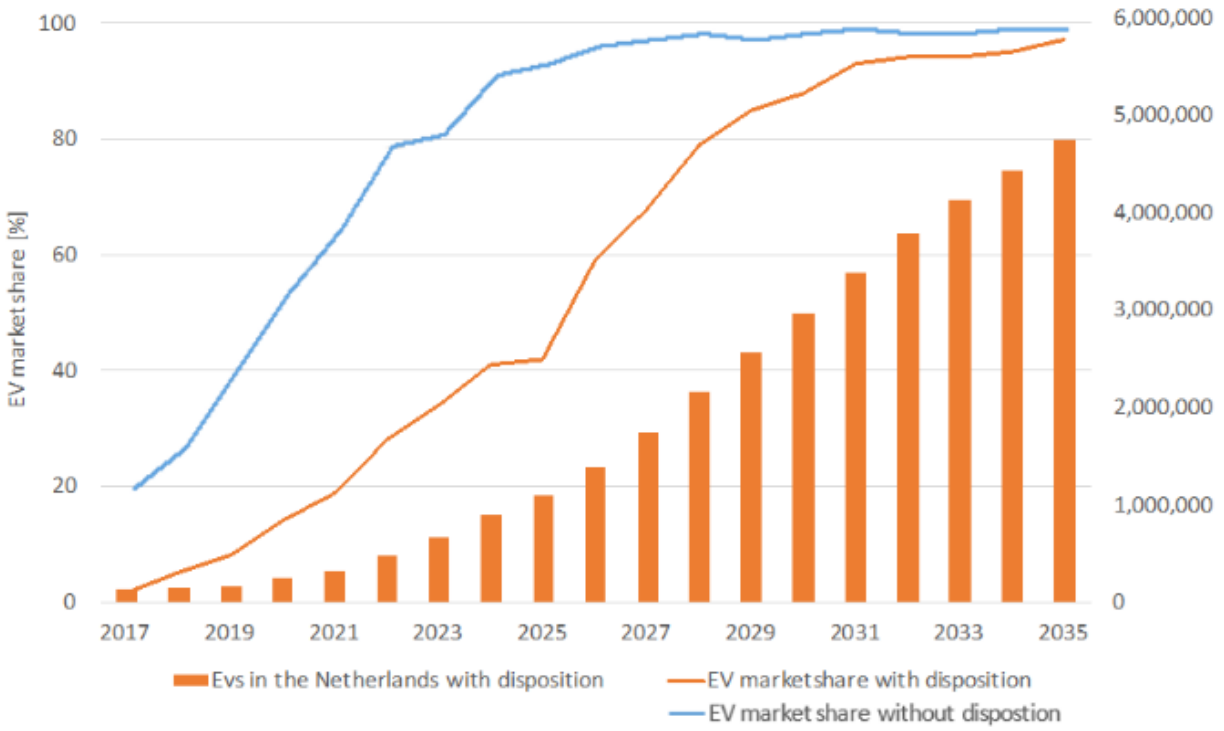
Om de ontwikkeling en groei in adoptie van elektrische voertuigen te ondersteunen is in het Klimaatakkoord door de overheid, het bedrijfsleven en brancheorganisaties een Nationale Agenda Laadinfrastructuur (NAL) opgesteld waarin afspraken zijn gemaakt om te voorzien in de laadbehoefte van het groeiende aantal elektrische voertuigen door een versnelde realisering van laadinfrastructuur. Het

voornaamste doel van de NAL is om ervoor te zorgen dat de laadinfrastructuur is voorbereid op de uitrol van elektrische voertuigen in de komende jaren. Voor 2030 wordt een laadbehoefte van 1,8 miljoen laadpunten voorzien. Het realiseren van dit aantal is een grote opgave, waarbij er uiteindelijk 700 laadpunten per dag geplaatst moeten worden. Hiervoor zijn afspraken gemaakt met de betrokken organisaties op verschillende gebieden ten behoeve van het versnellen van het proces en het vaststellen van basisvoorwaarden, met als uitgangspunt dat er geen directe overheidsfinanciering nodig is voor de aanleg en exploitatie van de laadinfrastructuur. Dit gaat bijvoorbeeld om het organiseren van regionale samenwerkingsregio's die samen met gemeenten lokaal de uitrol faciliteren, het opstellen van plaatsingsbeleid door regio's of gemeenten om laadinfrastructuur vanaf 2021 proactief te kunnen gaan plaatsen i.t.t. het huidige reactieve beleid, het tweejaarlijks actualiseren van dit plaatsingsbeleid, het aanwijzen van locaties voor snelladers door de lokale samenwerkingsregio's, het voorzien van richtlijnen en informatie over plaatsingsbeleid door kennisorganisaties aan lokale regio's, het vaststellen van verplichtingen om laadinfrastructuur te realiseren bij grote parkeerplaatsen in geval van nieuwbouw of renovatie, het faciliteren van snelladers langs snelwegen door Rijkswaterstaat, het opstellen van een integraal overzicht en neutrale tool voor het aanvraag- en realisatieproces door kennisorganisaties, het volgen en onderzoeken van actuele marktontwikkelingen, het opstellen van regelgeving rondom gebruik van laadpunten en interoperabiliteit en het borgen van opleidingen en voorlichting voor laadinfrastructuur. Andere vlakken waar afspraken zijn gemaakt gaan om het verbeteren van informatievoorziening over locatie, beschikbaarheid, laadprijs en open protocollen, het inzetten van *smart-charging* om een stabiel en duurzaam elektriciteitsnetwerk te realiseren, het toekomstbestendig maken van laadinfrastructuur door te blijven focussen op innovatie en het realiseren van een gedegen laadinfrastructuur voor de logistieke sector (Klimaatakkoord, 2019a).

Prognoses

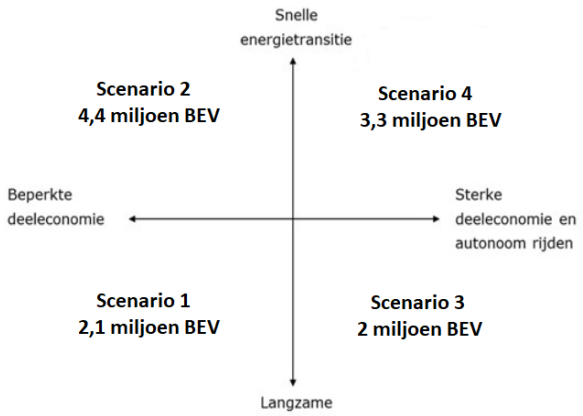
Al sinds enkele jaren neemt het aantal volledig elektrische voertuigen (BEV) in Nederland flink toe. Vanaf 2017 is er zelfs elk jaar ongeveer een verdubbeling te zien en momenteel in 2019 zijn er ongeveer 80.000 BEVs in Nederland (RVO, 2020). De snelheid van deze adoptie hangt voornamelijk af van de acceptatie van consumenten wat betreft elektrisch vervoer en van de kennis van consumenten over de kostenvoordelen die BEVs bieden over de gehele levensduur (Ecofys, 2016). Een belangrijke factor hierin zijn de *Total Costs of Owhership* (TCO), welke rekening houden met aspecten die invloed hebben op de totale kosten waaronder de aanschafprijs, verzekering, belasting, brandstof, batterijkosten, onderhoudskosten, restwaarde, brandstofefficiëntie en jaarlijkse kilometrage. Deze TCO verschilt per consument en daardoor wordt vaak onderscheid gemaakt tussen consumentgroepen zoals zakelijke rijders, woonwerkrijders en privérijders. Verder blijkt dat batterijkosten een van de belangrijkste factoren is binnen de TCO, echter zijn deze in snel tempo dalende (Ecofys, 2016; Hoekstra, 2017). De verwachting is dat de TCO van een BEV aantrekkelijker wordt dan die van een conventioneel benzinevoertuig als de batterijkosten dalen tot 125-150 $ per kWh (in 2018 was deze 176$/kWh) (UCS, 2018). Ecofys (2016) geeft aan dat voor zakelijke rijders een BEV al vaak aantrekkelijker is als gekeken wordt naar de TCO. Voor woonwerkrijders zou dit omslagpunt tussen 2018 en 2020 moeten liggen, en voor privérijders tussen 2020 en 2027. ING (2017) verwacht dit omslagpunt rond 2024 en de Rabobank (2018) al in 2021. Hoekstra (2017) heeft deze ontwikkeling uitgebreider onderzocht via het SparkCity model, wat elektrisch vervoer in Nederland modelleert en voorspelt via een agent-gebaseerde simulatie en op basis van GIS kaarten. Hieruit blijkt dat een BEV in 2017 al een lagere TCO had voor 20% van de potentiële autokopers. In 2021 geldt dat voor meer dan de helft en in 2030 voor vrijwel 100%, zie grafiek 7. Als de TCO voor een elektrisch voertuig minder zijn dan die van een benzinevoertuig, betekent dit echter niet dat iemand altijd tot

aanschaf over gaat, wat te wijten kan zijn aan niet-financiële overwegingen zoals onbekendheid met elektrisch rijden, de actieradius, beschikbaarheid van laadinfrastructuur of leverbaarheid van modellen. Duidelijk is echter dat het omslagpunt aanstaande is, wat kan gaan zorgen voor een grote groei in de adoptie van volledig elektrische voertuigen.



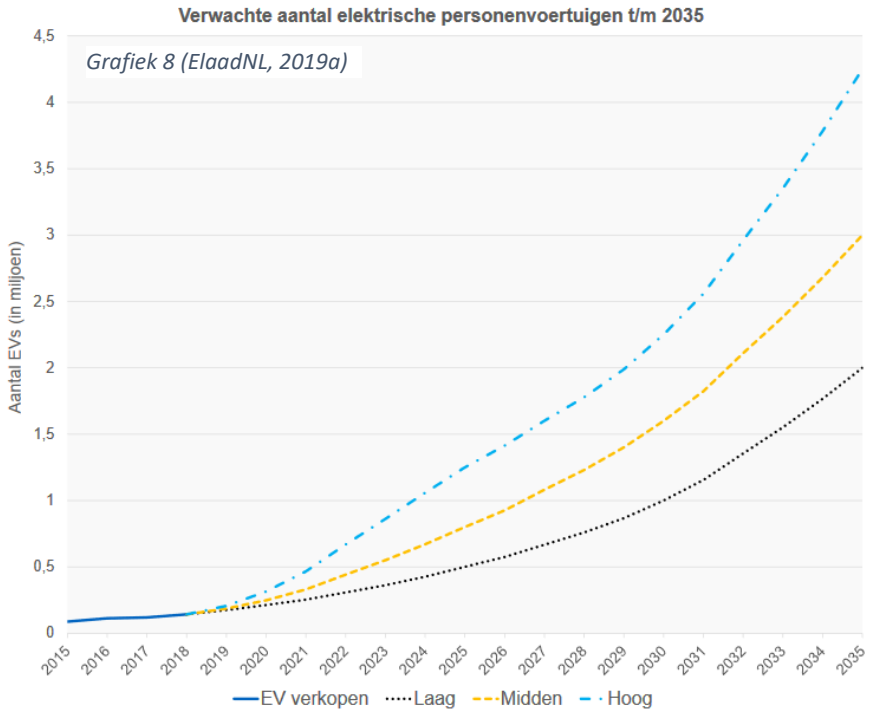
Grafiek 7: % BEVs met lagere TCO (blauw), % BEVs dat wordt verkocht (oranje) en totaal aantal BEVs (Hoekstra, 2017)

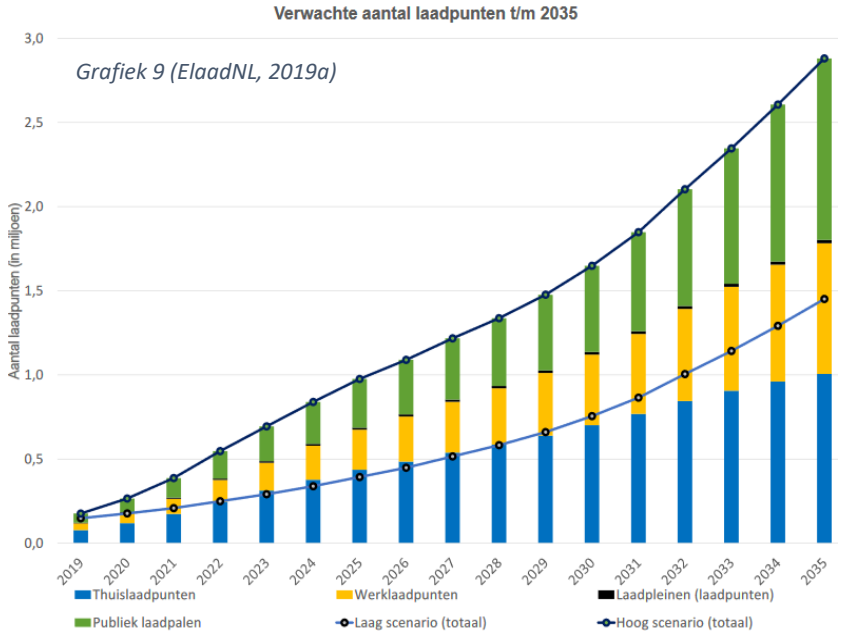
De verschillende prognoses in aantal BEVs laten ook een sterke groei zien in elektrische personenvoertuigen. Elektrische busjes of bestelauto's worden niet meegenomen in onderstaande voorspellingen. Hoekstra (2017) verwacht in 2025 ongeveer een miljoen elektrisch voertuigen en drie miljoen in 2030, wat bijna een derde is van het totale wagenpark (CBS, 2019c). In 2035 wordt een aantal van bijna vijf miljoen verwacht. Dit model houdt echter geen rekening met de opkomst van zelfrijdende deelauto's, wat het aantal voertuigen kan doen afnemen. Steinbuch (2016) is professor aan de TU Eindhoven en houdt zich onder andere bezig met prognoses rond elektrisch vervoer. Zijn verwachting is dat in 2025 ruim 800.000 elektrische voertuigen rondrijden in Nederland. Ecofys (2016) heeft prognoses opgesteld voor het verloop van adoptie tot 2035 aan de hand van vier scenario's, ingedeeld op basis van de mate van gedeeld rijden en de snelheid van de energietransitie. Deze prognoses voor 2035 variëren van 2 tot 4,4 miljoen BEVs.



Figuur 7: Toekomstscenario's BEV 2035 (Ecofys, 2016)

Ook ElaadNL (2019a) heeft onderzoek gedaan naar de verwachte groei van volledig elektrische personenauto's. Hierin worden drie scenario's aangehouden, waarbij het gemiddelde scenario uitgaat van anderhalf miljoen BEVs in 2030 en drie miljoen in 2035. Verder blijkt uit enkele interviews met experts dat in het meest realistisch geachte scenario ook uit wordt gegaan van ongeveer anderhalf miljoen BEVs in 2030. Daarnaast zijn er echter ook nog scenario's die minder (1 tot 1,2 miljoen) en meer (1.8 tot 2miljoen) voorspellen (van Leeuwen, 2019). Uit deze voorspellingen kan geconcludeerd worden dat de verwachting is dat elektrische voertuigen een behoorlijke groei in adoptie zullen ervaren de komende jaren. Het omslagpunt in TCO wordt verwacht tussen 2021 en 2024. De grens van een miljoen wordt waarschijnlijk tussen 2025 en 2030 doorbroken. Op de langere termijn variëren de voorspellingen echter meer door onzekerheid in de opkomst van autodelen. Wel kan gesteld worden dat waarschijnlijk een derde van het wagenpark in Nederland volledig elektrisch zal zijn tussen 2030 en 2035.



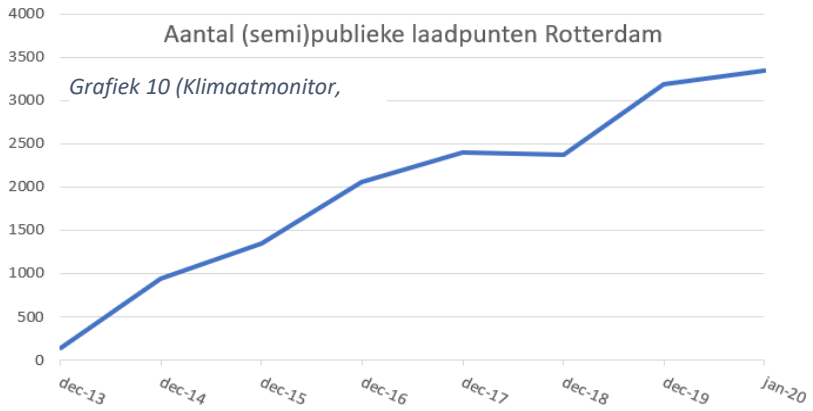


Wat betreft de laadinfrastructuur in Nederland heeft de overheid in het Klimaatakkoord als doel gesteld dat er 1,8 miljoen laadpunten gerealiseerd moeten zijn in 2030. Dit gaat om het totale aantal laadpunten, inclusief privé laadpunten. Om dit te bereiken moeten er een behoorlijk aantal laadpunten geplaatst worden per dag. Voor publieke laadpunten is de verwachting dat dit in 2030 gaat om 217 publieke laadpalen per dag, waarbij elke laadpaal twee laadpunten heeft (Klimaatakkoord, 2019a). Een significant deel van de Nederlandse gemeenten heeft in 2030 een groot publiek laadnetwerk nodig, in veel gevallen meer dan 1.000 laadpunten per gemeente en in de grote steden een veelvoud hiervan.

Hierdoor is het belangrijk voor gemeenten om strategisch locaties te bepalen zodat de laadpunten optimaal benut worden (ElaadNL, 2019b). In de prognose van ElaadNL (2019a) is de verwachting dat het totaal aantal laadpunten in 2035 zal groeien tot bijna drie miljoen, waarvan ongeveer twee derde (semi)publieke laadpunten zijn. Voor 2030 is de verwachting dat er iets meer dan anderhalf miljoen laadpunten zijn, waarvan ongeveer de helft (semi)publiek is. Zie grafiek 9.

Rotterdam

De focus van dit onderzoek ligt op de gemeente Rotterdam, welke qua inwoners de tweede stad van Nederland is met ruim 600.000 inwoners. De populatiedichtheid van de gemeente Rotterdam is bijna 3000 inwoners per vierkante kilometer en staat daarmee op de 21e plaats in Nederland. In totaal zijn er in Rotterdam ongeveer 225.000 personenvoertuigen, wat bijna gelijk is aan het aantal personenvoertuigen in Amsterdam. Per duizend inwoners zijn er in Rotterdam ongeveer 350 personenvoertuigen, waarmee het op de vierde plaats staat van de vijf grootste gemeenten in Nederland (CBS, 2019d). Wat betreft het aantal volledig elektrische auto's zijn er 1471 voertuigen geregistreerd in Rotterdam (Klimaatmonitor, 2019). Het kan echter zijn dat dit bedrag een onderschatting is doordat elektrische auto's momenteel nog vaak leaseauto's zijn, die staan ingeschreven in de gemeente waar het leasebedrijf is gevestigd. Dit is te zien aan het feit dat er in 2019 meer dan 10.832 unieke gebruikers van laadpunten zijn in Rotterdam. In prognoses geeft de gemeente Rotterdam aan dat de verwachting is dat er in 2025 ruim 35.000 volledig elektrische voertuigen zullen zijn en ruim 100.000 in 2030 (J. Akkerhuis, personal communication, 2020). Ook is er in 2018 meer dan 500.000 keer geladen, wat neerkomt op een energiebehoefte van ongeveer 4,4 miljoen kWh per jaar (Gemeente Rotterdam, 2019). Als gekeken wordt naar de laadinfrastructuur zijn er in januari 2020 meer dan 3.300 (semi)publieke laadpunten in Rotterdam. In Nederland heeft alleen Amsterdam er meer (5088) (Klimaatmonitor, 2019). Zie grafiek 10 en tabel 7.



Grafiek 10 (Klimaatmonitor,

De publieke laadpaal die gebruikt wordt in Rotterdam is de EVBox PublicLine. Dit is een laadpaal voor commercieel en openbaar gebruik. De paal heeft twee aansluitingen en kan dus twee elektrische voertuigen tegelijk opladen. Het laadvermogen bedraagt 11kW per voertuig en hiervoor is een hoofdaansluiting van 3-fase en 400V nodig, met 16A of 32A. De aansluiting is een Type 2 connector en autorisatie vindt plaats met een RFID pas, waarna via een mobiel netwerk contact wordt gezocht met het centrale beheerpunt (EVBox, 2020).

Tabel 7: aantal (semi)publieke laadpunten in Rotterdam (Klimaatmonitor, 2019)

	31-12-2017	31-12-2018	31-12-2019	31-01-2020
(semi)-publieke laadpunten	2399	2374	3190	3346

Plaatsingsbeleid in Nederland

Het plaatsingsbeleid rondom laadinfrastructuur in Nederland behoort toe aan gemeenten, echter bestaat hier geen uniforme aanpak voor. Het Nationaal Kennisplatform Laadinfrastructuur (2019) biedt gemeenten wel een handreiking welke ondersteuning biedt om tot een visie en beleid rondom laadinfrastructuur te komen. Het gaat hier dan om informatie over keuzes die gemeenten moeten maken. Bijvoorbeeld wat de ambitie is en welke rol een gemeente kan innemen; stimulerend, faciliterend of regulerend. Of waar de focus van een gemeente kan liggen; publieke of private laadinfrastructuur. Het uitvoeringsmodel is ook van belang, oftewel hoe gemeenten samenwerken met marktpartijen, alsook keuzes over de techniek, het elektriciteitsnet en het verkeersbesluit om parkeerplaatsen voor laadpunten aan te wijzen. Het plaatsingsbeleid is echter een van de belangrijkste keuzes rondom laadinfrastructuur. Wanneer precies tot plaatsing wordt overgegaan is het eerste element waar een gemeente over na moet denken. Vooralsnog is het gebruikelijk voor veel gemeenten om pas tot plaatsing over te gaan als er een aanvraag komt van een bewoner. Echter zal het nodig gaan zijn om proactief laadpunten te gaan plaatsen om de groei van elektrisch vervoer op te kunnen vangen. De keuze hierin is dus beperkt tot plaatsen op basis van een aanvraag, het actief plaatsen van laadpunten of een combinatie. De volgende vraag is dan waar de laadpaal geplaatst gaat worden. Bij het actief plaatsen kan gekeken worden naar strategische locaties zoals bedrijventerreinen, sportclubs of P+R-locaties. Ook kan gebruiksdata van bestaande laadpunten geraadpleegd worden. Daarnaast kan er gebruik gemaakt worden van voorspellingen over de verwachte vraag en door op deze manier locaties te bepalen voor een groter gebied. Hier kan dan rekening worden gehouden met spreidingscriteria om ervoor te zorgen dat er een minimale afstand tussen laadpunten is om wildgroei te voorkomen. De verwachte laadbehoefte bepalen is niet eenvoudig, daarom kan er gebruik gemaakt worden van bijvoorbeeld gepubliceerde kencijfers of prognoses uitgevoerd door adviesbureaus. Als de locatie eenmaal bepaald is, kan worden overgegaan tot plaatsing. Hierbij moet nog rekening worden gehouden met plaatsingscriteria op straatniveau. Als het een aanvraag vanuit een bewoner betreft wordt bijvoorbeeld vaak eerst getoetst of de bewoner op eigen terrein kan laden of op een (semi)publieke locatie binnen een bepaalde afstand. Daarnaast kan er worden gekeken naar de afstand en positie ten opzichte van het elektriciteitsnet, de straatinrichting zoals openbaar groen, trottoirs, containers of straatmeubilair, de inrichtingskaders voor parkeervakken, esthetische en veiligheidseisen, parkeersituaties zoals betaald of vergunning parkeren en de bestaande verkeerssituatie en -stromen. Vaak wordt ook gebruik gemaakt van criteria zoals een minimale afstand tot bestaande laadpunten, een minimale of maximale afname (bijvoorbeeld in kWh) per laadlocatie, een minimale en maximale afstand tot de voordeur in het geval van een aanvraag en de mogelijkheden voor toekomstige uitbreiding tot eventueel een laadplein.

Als voorbeeld van gemeentelijk beleid wordt hieronder ingegaan op de aanpak van laadinfrastructuur van de gemeente Rotterdam in Nederland, de tweede stad in Nederland qua aantal inwoners. Rotterdam heeft de ambitie om elektrisch rijden te ondersteunen door een op de vraag afgestemd laadnetwerk. De voornaamste uitgangspunten van het beleid rondom laadinfrastructuur van de gemeente Rotterdam zijn dat er geen laadpalen worden geplaatst zonder dat er al voldoende vraag naar laden is en dat laden op eigen terrein de voorkeur heeft. De rol van de gemeente is dan ook faciliterend; de markt en burgers wordt ruimte gegeven om zelf laadoplossingen te realiseren, waarvoor de gemeente de randvoorwaarden creëert en budget beschikbaar stelt, zodat de tot nog toe onrendabele businesscase wordt ondersteund. Het uitgangspunt voor uitbreiding van de laadinfrastructuur is een normaal laadpunt, dat voornamelijk geplaatst dient te worden in de buurt van thuis of bij de werklocatie, aangezien dit de voornaamste

locaties zijn waar elektrische rijders laden in Rotterdam. Deze laadpunten worden vraaggestuurd geplaatst. Er kunnen drie aanleidingen zijn voor plaatsing. De voornaamste is een aanvraag vanuit een bewoner. Ook kan er gekeken worden naar de laadgegevens van bestaande laadinfrastructuur of naar prognoses van de verwachte vraag per gebied in de toekomst. Deze laatste twee proactieve aanleidingen worden verder echter niet toegelicht in de beleidsaanpak van Rotterdam. In het geval van een aanvraag vanuit een bewoner is wel een werkwijze opgesteld. Als eerste wordt getoetst of de aanvrager mogelijkheid heeft om te parkeren op eigen terrein en hier op te laden. Als dit het geval is, dan wordt de aanvraag afgewezen. Zo niet, dan wordt gekeken of er al een bestaande laadpaal beschikbaar is binnen een straal van 250 meter van de woning van de aanvrager. Als dit zo is, dan wordt op de bestaande laadpaal een tweede laadpunt gerealiseerd, aangezien elke laadpaal plaats heeft voor twee laadpunten. Als er geen ruimte is op een laadpaal binnen 250 meter wordt er getoetst of de vraag een minimum afname van 2000 kWh per jaar betreft. Zo ja, dan wordt de paal geplaatst, en zo niet, dan wordt gewacht met plaatsen tot een tweede aanvraag. Deze grens van 2000 kWh per jaar kan worden gewijzigd door de marktpartij die meedingt naar de aanbesteding, en kan zodoende verlaagd worden als dit past binnen de businesscase. In het geval van Rotterdam is de energieleverancier ENGIE de marktpartij. Als uiteindelijk wordt overgegaan tot plaatsing wordt een locatie op straat of in een gemeentelijke parkeergarage geselecteerd. Er wordt enkel een bestaand parkeervak veranderd naar een oplaadvak, er worden geen nieuwe parkeerplaatsen gerealiseerd. Bij het selecteren van de locatie wordt met verschillende factoren rekening gehouden. Er wordt gebruik gemaakt van strategische kaarten waar de verwachte laadbehoefte in een gebied is weergegeven en ook dient de locatie binnen 250 meter van het adres van de aanvrager te liggen. De laadpaal wordt bij voorkeur geplaatst bij een laadplein of een potentiële aangewezen locatie hiervoor waar meerdere laadpalen of een tweede laadpunt gerealiseerd kunnen worden. Ook wordt rekening gehouden met de vindbaarheid van de locatie (bij voorkeur direct na een kruising) en de bruikbaarheid voor andere gebruikers. Daarnaast worden er geen laadpalen geplaatst in drukke winkelstraten en zijn de laadpunten niet op kenteken gereserveerd, behalve voor gehandicapten met een eigen parkeerplaats. Verder geldt dat de oplaadvakken alleen gebruikt mogen worden door elektrische auto's die ingeplugd zijn, zodoende hoeft deze niet verplaatst te worden als de auto volledig opgeladen is. Dit wordt echter wel gestimuleerd via een connectiviteitstarief, wat betaald wordt over de gehele tijd dat de auto aangesloten is aan de laadpaal en wat geldt tussen acht uur 's ochtends en tien uur 's avonds. Dit geldt alleen voor straatparkeren. Daarnaast dienen elektrische auto's die in een betaald parkeergebied opladen het normale tarief aan parkeergeld te betalen. En indien de aanvraag werd gedaan voor een betaald parkeergebied is het noodzakelijk dat de aanvrager in bezit is van een parkeervergunning (Gemeente Rotterdam, 2015). Zie figuur 8 voor een overzicht van de werkwijze bij een aanvraag.

Figuur 8 schematische werkwijze bij aanvraag van laadpaal vanuit bewoners (Gemeente Rotterdam, 2015)

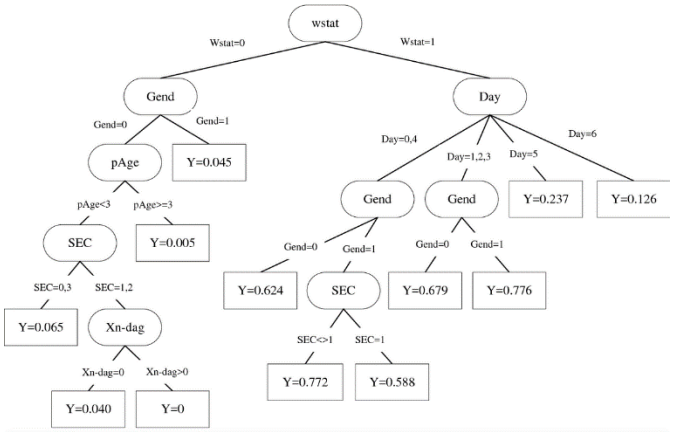
2.2 Activiteiten-gebaseerde modellen

Om beleidsinterventies voor het mobiliteitsdomein te analyseren en de verkeersvraag te voorspellen zijn verschillende methodes ontwikkeld, zoals het 4-stapsmodel of entropie maximaliserende modellen. Deze modellen houden echter geen rekening met het feit dat verkeersstromen een manifestatie zijn van activiteitenpatronen en dat verplaatsen geen doel op zich is. Activiteiten-gebaseerde modellen doen dit wel. Hierbij wordt niet alleen rekening gehouden met mobiliteitsbeleid, maar ook met socio-economisch en ruimtelijk beleid. Daarnaast worden ook tijd, ruimte, huishoudelijke, situationele en institutionele restricties meegenomen in deze modellen om het reisgedrag van een individu zo realistisch mogelijk te modelleren en voorspellen, zoals openingstijden, dat kinderen op een bepaalde tijd naar school moeten worden gebracht of dat een bepaalde activiteit niet uitgevoerd kan worden op een bepaalde locatie (Arentze & Timmermans, 2004). Dit wordt gedaan om voor een individu te bepalen of voorspellen welke activiteit wordt uitgevoerd, waar, wanneer, hoe lang, met wie en met welke transportmodus. Deze informatie is over de jaren steeds noodzakelijker geworden doordat mobiliteitsbeleid zich ontwikkelde en complexer werd. Beleid was niet meer alleen gericht op het toevoegen van capaciteit, maar op het beter managen van de vraag en de bestaande capaciteit, waar de verouderde modellen niet geschikt voor waren. Deze vernieuwde activiteiten-gebaseerde modellen zorgden er echter wel voor dat er meer en gedetailleerdere data nodig was. Niet alleen over verkeersstromen, maar ook over activiteitenpatronen en de onderliggende verschillende keuzedimensies die hiertoe leiden (Arentze et al., 2000).

Voor de opbouw van een activiteiten-gebaseerd model is dus een verscheidenheid aan data nodig van verschillende elementen over een representatief deel van een populatie. Er is activiteitendata nodig op een gedetailleerd niveau, zowel activiteiten die een persoon uitvoert binnen en buiten het huis. Ook is locatiedata nodig over deze activiteiten, en niet alleen over de geografische locatie van een activiteit, maar ook over attractiviteit van een locatie, zoals grootte, kosten, aantal parkeerplaatsen of serviceniveau. Daarnaast is er tijdsdata nodig, zowel de start- als de eindtijd van een activiteit. Data over met wie de activiteit wordt uitgevoerd is niet noodzakelijk, maar kan wel nuttig zijn. Als laatste is data over de transportmodus nodig, oftewel welk vervoersmiddel is gebruikt om een trip naar een activiteit uit te voeren, en ook over de attractiviteit van elke modus, zoals kosten, comfort of reistijd. Ook kunnen verklarende factoren bruikbaar zijn in het model, zoals institutionele (regels, openingstijden), ruimtelijke (landgebruik), transport (reistijden, frequenties, kosten) en socio-demografische data (geslacht, leeftijd, inkomen). Het verkrijgen van de activiteitendata gebeurt voornamelijk door het verzamelen van activiteitendagboekjes op één of meerdere dagen in de week, waarin een representatieve groep respondenten hun dagelijkse reisgedrag en activiteiten bijhouden. Hierin moeten de respondenten elke activiteit noteren, waar ze naartoe gaan, hoe laat en met welke modus. In het begin gebeurde dit voornamelijk door de respondenten zelf hun dagboekjes in te laten vullen en vervolgens op te sturen naar de onderzoekers. Recentelijk is echter het gebruik van een app op de smartphone een makkelijkere methode gebleken doordat deze automatisch de locatie en tijd registreert, waarna de respondent nog het type activiteit en de modus kan toevoegen of de geregistreerde data kan bewerken. De data over de verklarende factoren wordt meestal verzameld door veldwerk of verkregen uit bestaande databases (Arentze et al., 2000).

De keuzeprocessen in een activiteiten-gebaseerd transportmodel kunnen vervolgens uitgevoerd worden door de verzamelde data te gebruiken om keuzebomen op te stellen in een leeralgoritme. Eerst worden er activiteitencategorieën geclassificeerd, waaronder vaste (werk, school, slapen, eten) en flexibele activiteiten (winkelen, sporten, vrijetijdsbestedingen). Vervolgens wordt deze data gebruikt om meerdere

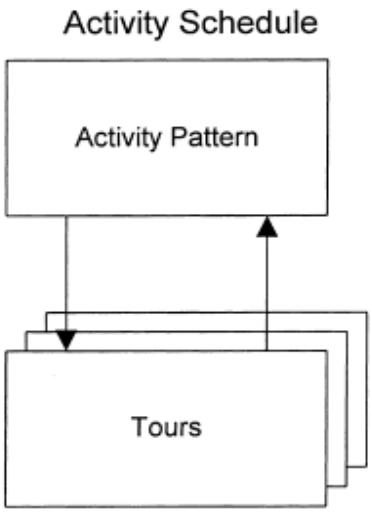
keuzebomen te creëren (het leeralgoritme) voor de keuzestappen in het model. Dit wordt gedaan door een deel van de data (de trainingsdata) te gebruiken om de keuzebomen op te stellen. Hierbij is een knooppunt een keuze of test op een bepaalde variabele en laten de verschillende takken de resultaten zien van een test. Via de geobserveerde keuzes in de trainingsdata worden zo de kleinst mogelijke keuzebomen opgesteld waar alle trainingsdata onder te verdelen is, zoals bijvoorbeeld keuzebomen voor welke modus gebruikt wordt om te reizen of welke activiteit uitgevoerd wordt. Het resterende deel van de data (de testdata) wordt vervolgens gebruikt om het opgestelde leeralgoritme van meerdere keuzebomen te testen en te zien of het overdraagbaar is op andere situaties. Er wordt dan gekeken of de 'nieuwe' data binnen de gemaakte keuzebomen past. Door uiteindelijk dan nog de eerder genoemde restricties in te bouwen kan het keuzeproces voltooid worden (Arentze & Timmermans, 2004).



Figuur 9: voorbeeld keuzeboom FEATHERS voor werkactiviteit

Een andere veelvoorkomende achterliggende methode om keuzeprocessen uit te voeren is het discrete keuzemodel. Dit is een statistische methode gebaseerd op logistische regressie die beschrijft hoe een individu een keuze maakt uit een set discrete alternatieven. Dat wil zeggen, een set alternatieven die elkaar uitsluiten en alomvattend en eindig zijn. Hierbinnen heeft elk alternatief een bepaalde waarde van nut die gebaseerd is op de attributen van het alternatief en de socio-demografische karakteristieken van degene die de keuze maakt. Het discrete keuzemodel selecteert dan het alternatief met de hoogste waarde van nut (Antonini et al., 2006; Ben-Akiva & Lerman, 1985).

Dit type model heeft toepassingen in meerdere sectoren, waaronder dus de mobiliteitssector en meer specifiek binnen activiteiten-gebaseerde transportmodellen om bijvoorbeeld voor een individu een keuze te maken uit een set activiteitenpatronen of schema's over één dag. Zo'n schema bestaat uit een set van tours, welke bestaan uit verschillende trips die uitgevoerd worden. Voor elk alternatief binnen een bepaalde keuze wordt de kans geschat dat een individu dit alternatief kiest, oftewel elk activiteitenschema krijgt een kans toegewezen die gebaseerd is op de kans op een bepaald activiteitenpatroon en de kans op een specifieke set tours bij een gegeven activiteitenpatroon. De keuze van het activiteitenpatroon hangt echter ook af van de attractiviteit of nut van de onderliggende tours in een activiteitenpatroon, waardoor de kans op een bepaald activiteitenpatroon een functie is van alle attributen van alle beschikbare tours. Attributen zijn hierbij factoren die de attractiviteit bepalen, zoals kosten of serviceniveau. Een activiteitenpatroon bestaat minimaal uit een primaire activiteit (bijvoorbeeld werken of thuisblijven), de bijbehorende sequentie van activiteitenstops en de sequentie van een of meerdere secundaire tours (zoals vrijetijdsbestedingen). Binnen de keuze voor een bepaalde tour zit ook nog de keuze voor de activiteitenlocatie(s), de



Figuur 10: model-framework voor het activiteitenschema (Bowman & Ben-Akiva, 2001)

tijd of duur van de activiteit en de modus die gebruikt wordt om naar de activiteit te gaan. Voor bijvoorbeeld de moduskeuze wordt gekeken naar de attributen van de alternatieven, zoals kosten, verbruik of reisduur, en wordt dit statistisch gerelateerd aan de karakteristieken van het individu om zo de kansen in te schatten voor alle alternatieven. Zo'n model wordt toegepast op elk individu binnen een representatieve populatie om een activiteitenschema te voorspellen of een set van kansen voor de alternatieven te schatten. Hierbij wordt informatie over de sequenties, tijdskeuzes, moduskeuzes en bestemmingskeuzes binnen een activiteitenschema omgezet in een set van trips en tours, welke bijvoorbeeld ook geaggregeerd kunnen worden in trip matrices om het serviceniveau van een transportsysteem te voorspellen. Voor het opzetten van discrete keuzemodellen wordt representatieve dagboekdata (veelal verzameld over 24 uur), transportsysteemdata (attributen die de attractiviteit van alternatieven weergeven) en socio-demografische data (karakteristieken van individuen) gebruikt in statistische regressiemethodes, om zo de activiteitenschema's van individuen te bepalen op basis van meerdere geobserveerde keuzes tussen discrete alternatieven (Bowman & Ben-Akiva, 2001).

Het gebruik van keuzebomen of discrete keuzemodellen binnen een activiteiten-gebaseerd transportmodel hoeft elkaar niet uit te sluiten. Deze kunnen afzonderlijk worden gebruikt om verschillende keuzeprocessen uit te voeren. Het FEATHERS-model, dat in dit onderzoek is gebruikt, maakt bijvoorbeeld gebruik van keuzebomen voor de keuzeprocessen van activiteit, tijdsduur en vertrektijd, en van discrete keuzemodellen voor de keuzeprocessen van bestemming en modus. De integratie van beide methodes is een bijzondere eigenschap van het FEATHERS model, wat automatisch het gehele model kan schatten op basis van de verschillende types verzamelde data en vervolgens het model kan uitvoeren en de uitkomsten van het model direct vergelijkt met de geobserveerde data (de Romph et al., 2018).

De kern van een activiteiten-gebaseerd transportmodel is het voorspellen van activiteitensequenties in bepaalde scenario's. Het model voorspelt meestal per individu en per dag welke activiteiten uitgevoerd worden in een bepaalde volgorde, te beginnen met de primaire activiteit en daaromheen één of meerdere secundaire activiteiten en ook worden deze onderverdeeld in vaste en flexibele activiteiten. Er kunnen in het model verschillende variabelen aangepast worden, waarna duidelijk wordt wat voor impact deze aanpassing heeft op bijvoorbeeld het totale aantal voertuigkilometers of het gebruik van een bepaalde modus. Hierdoor zijn er verschillende toepassingen mogelijk. Activiteiten-gebaseerde modellen kunnen worden gebruikt voor het evalueren van beleidsmaatregelen, zoals de impact op voertuigkilometers als meer mensen thuiswerken, of de effecten van een verbeterd busnetwerk op het gebruik van openbaar vervoer. Een andere toepassing ligt in de klimaatproblematiek, aangezien activiteiten-gebaseerde modellen gebruikt kunnen worden om luchtvervuiling en uitstoot te voorspellen (Beckx, Panis, et al., 2009; Hatzopoulou & Miller, 2010), alsook om blootstelling van de populatie aan polluenten zoals NO_2 vast te stellen op verschillende locaties en tijdstippen en bij verschillende activiteiten (Beckx, Int Panis, et al., 2009). Daarnaast kunnen deze modellen gebruikt worden om deze blootstelling tegen te gaan door te focussen op het aanpassen van activiteitenpatronen of door te richten op specifieke groepen in de populatie, doordat bijvoorbeeld bekend is dat personen in lagere socio-economische groepen blootgesteld worden aan hogere concentraties van polluenten dan personen in hogere socio-economische groepen (Panis et al., 2009).

2.3 Voorspelling en bepaling laadbehoefte en -locatie

In de literatuur zijn er verschillende publicaties bekend over het bepalen of voorspellen van de laadbehoefte en -locatie. Dit wil zeggen; een verscheidenheid aan methodes die de grootte of de locatie van de behoefte aan laadpalen voorspellen in een bepaald gebied. Deze variabele kan verschillende vormen aannemen, zoals de energiebehoefte, het aantal laadpunten of het aantal elektrische auto's dat laadt op een dag.

Meerdere typen modellen zijn gebruikt om de laadinfrastructuur te optimaliseren. Vooraleerst werden deze toegepast voor het selecteren van optimale locaties voor tankstations voor waterstofauto's. Kuby et al. (2009) gebruikten een eerder door Kuby ontwikkeld *flow-refueling* locatie model om de laadinfrastructuur voor waterstof te optimaliseren in Florida, VS. Dit model maakt gebruik van operationeel onderzoek en GIS-technieken, samen met transport databases waarin een wegnetwerk met herkomst-bestemming volumes, de maximale rijafstand tussen tanklocaties en het aantal tanklocaties is verwerkt. Het model bepaalt dan de meest optimale infrastructuur voor tankstations voor waterstofauto's waarbij het maximale volume van voertuigkilometers kan worden voorzien van genoeg tankbeurten. Nadelen van deze *flow-capturing* methode is dat het niet rekening houdt met het verschil tussen korte en lange reizen, en dat er herkomst-bestemming data nodig is, welke moeilijk is om te verzamelen (Lin et al., 2008). Anderen maakten gebruik van de *p-median* methode waarbij van een grote set van mogelijke locaties een subset wordt geselecteerd waarbij de gemiddelde reistijd tot de dichtstbijzijnde locatie wordt geminimaliseerd. Nicholas, Handy en Sperling (2004) pasten dit toe in Sacramento County in de VS door in een GIS alle mogelijke locaties met hun reistijd vanuit elke verkeerszone weer te geven. Via een computermodel werden vervolgens een groot aantal scenario's geanalyseerd om de subset te vinden met de laagste gemiddelde reistijd naar een tankstation. Ook Lin et al. (2008) gebruikten een vergelijkbare aanpak in zuid Californië in de VS waarbij de locatiekeuze wordt benaderd als een netwerkprobleem en waarbij alleen de distributie van voertuigkilometers als data nodig is. Het doel was om een netwerk te selecteren met een geminimaliseerde totale reistijd tot een tankstation. Als de totale reistijd geminimaliseerd is, dan is ook de gemiddelde reistijd van een willekeurig persoon geminimaliseerd. Het nadeel was echter dat het bereik van de voertuigen niet werd meegenomen in de locatiebepaling (Y.-W. Wang & Lin, 2009).

Een andere methode is een agent-gebaseerd model, dat is toegepast in een generieke omgeving door Stephan en Sullivan (2004) om de groei van tankinfrastructuur voor waterstofauto's te onderzoeken. In agent-gebaseerde modellen worden verschillende afzonderlijke agenten gemodelleerd om het effect van hun acties en interacties op een geheel systeem te onderzoeken. Stephan en Sullivan (2004) gebruikten dit om in een generieke stad twee types agenten te modelleren; eigenaren van waterstofauto's en waterstofaanbieders. Deze aanbieders konden tankstations openen op aangewezen plaatsen waar waterstofauto's langs kwamen en zo ontstond een netwerk van tanklocaties. Dit model was echter niet realistisch, omdat geen echte stad of gebied werd gebruikt en ook omdat er maar twee agenten werden gebruikt. Het was zodoende een eerste stap, waarna Stephan het concept enkele jaren later toepaste op realistische geografische en demografische data. Ook is er onderzoek gedaan naar de optimale locatie van batterijwisselstations voor elektrische voertuigen in een *vehicle-to-grid* systeem, waarbij het batterijwisselstation kan dienen als opslag voor (duurzame) elektriciteit en kan opladen op momenten als de vraag laag is om zo de druk op het elektriciteitsnetwerk te verlagen. Hierbij werd rekening gehouden met zowel het transportnetwerk als het elektriciteitsnetwerk in een stochastisch programmeermodel om zo optimale locaties te selecteren die beide ten goede komen (Pan et al., 2010). Echter is het

batterijwisselconcept gefaald in het verleden, onder andere door hoge initiële kosten en gebrek aan standaardisatie, waardoor het onwaarschijnlijk lijkt dat dit concept een toekomst heeft voor personenvoertuigen op grotere schaal (van Leeuwen, 2019).

In de literatuur zijn ook verschillende methodes bekend die de laadinfrastructuur voor batterij-elektrische voertuigen optimaliseert door middel van het bepalen van de locatie, het aantal laadpunten of allebei. Een mogelijke methode kan omschreven worden als *set-covering*, wat in het algemeen inhoudt dat een subset locaties wordt gezocht uit de totale set van locaties die zo goed mogelijk de totale set weergeeft, maar waar wel een bepaald gewicht aan is verbonden, zoals laagste kosten. Wang en Lin (2009) pasten een vorm van deze methode toe voor het bepalen van de optimale locaties van snellaadstations voor elektrische voertuigen langs snelwegen of knooppunten in Taiwan. Hiervoor werden eerst alle mogelijke locaties geselecteerd waarna een herkomst-bestemming afstandsmatrix werd gebruikt om via een *flow-based set covering* locatie model te bepalen wat de meest optimale set van locaties is waarbij de totale laadbehoefte gecoverd wordt door een laadpunt binnen een bepaalde afstand. Ook werd rekening gehouden met het bereik van de elektrische voertuigen en daarnaast werd bekeken welke set de minst mogelijke totale kosten heeft. In de case van Taiwan waren er 51 mogelijke locaties. Echter bleek dat het optimale aantal locaties erg afhing van het bereik van de voertuigen, waarbij 50 kilometer bereik zorgde voor 42 snelladers en 250 kilometer maar voor 8 snelladers. Een toepassing van deze methode is ook gebruikt door Frade et al. (2011) om de optimale locatie van normale laadpunten te bepalen in een wijk in Lissabon, Portugal. Vooraleerst is de verwachte laadbehoefte ingeschat door via een regressie het aantal auto's per huishouden te bepalen voor alle blokken in de wijk, waarna aannames zijn gedaan over het percentage elektrische voertuigen en hoe vaak deze moeten laden op basis van het gemiddelde bereik en het gemiddeld aantal kilometer dat per dag gereden wordt. Om vervolgens het aantal laadpuntlocaties te selecteren die het best aan de verwachte laadbehoefte voldoen is een *maximal covering* model gebruikt. Dit model bepaalt van een mogelijk aantal locaties, de locaties die de laadbehoefte maximaliseren met een gegeven maximale afstand tot op z'n minst één laadlocatie. In deze case van de wijk in Lissabon werd er aangenomen dat alle 290 autoparkeerplaatsen een mogelijke locatie zijn voor minstens twee en maximaal tien laadpunten per parkeerplaats. Ook werd aangenomen dat elke laadsessie zes uur duurt en dat de maximale afstand tot een laadpunt 550 meter is. Dit leidde tot vier scenario's met verschillende aantallen laadpunten. De voornaamste tekortkoming in deze aanpak is echter de schatting van de laadbehoefte, welke gebaseerd kan zijn op oude data of onjuiste aannames over adoptie van elektrische voertuigen.

Sweda en Klabjan (2011) gebruikten agent-gebaseerd modelleren om de strategische uitrol van laadinfrastructuur mogelijk te maken in en rondom Chicago, VS. In dit model werden agenten gezien als bestuurders, welke elkaar beïnvloeden over hun voertuig aankoopbeslissingen. Agenten kregen waardes toegewezen zoals inkomen, *range anxiety* niveau en mate van duurzaamheid. Ook kregen ze per week een schema van activiteiten, zoals werk en andere lokale of verder weg liggende activiteiten. Agenten namen ook beslissingen over de aankoop van een nieuw voertuig (elektrisch of niet) op basis van prijs, de eigen mate van duurzaamheid, de invloed van buren of collega's die al een elektrisch voertuig hebben en de beschikbaarheid van laadinfrastructuur. Wat betreft de laadinfrastructuur werd uitgegaan van drie scenario's, waarbij het basis scenario de situatie is zoals die toentertijd was in Chicago en waar de andere twee scenario's allebei 70 laadpunten meer hebben. In deze scenario's werd uitgegaan van statistieken zoals de gemiddelde afstand tot het dichtstbijzijnde laadpunt, het gemiddeld aantal laadpunten binnen een bepaalde straal en de kans op een laadpunt in de buurt binnen een bepaalde straal. Een tekortkoming

in deze aanpak is dat er geen rekening is gehouden met de ruimtelijke patronen van laadpunten, maar alleen met bovengenoemde statistieken van uitrolstrategieën van laadinfrastructuur. Daarnaast ging het model er van uit dat elke elektrische auto altijd 's nachts thuis weer volledig oplaadt en dat er niet op het werk geladen kan worden, wat aannemelijker is in de VS door de grotere aanwezigheid van eigen opritten en garages, in tegenstelling tot Nederland.

De *set-covering* en agent-gebaseerde methodes zoals gebruikt in de eerder genoemde literatuur houden bij de optimale uitrol van laadpunten echter geen rekening met de interactie tussen het vervoerssysteem en het elektriciteitsnetwerk. Aanpassingen in het vervoerssysteem via beleid of regelgeving kunnen namelijk invloed hebben op de distributie van elektrisch vervoer, en daardoor ook op de energievraag en het elektriciteitsnetwerk. Andersom kan de uitrol van laadinfrastructuur ook invloed hebben op reispatronen en het vervoerssysteem. He et al. (2013) ontwikkelden een equilibrium model dat een optimale allocatie van een gegeven aantal laadpunten bepaalt om de sociale welvaart te maximaliseren en hierbij rekening houdt met de interactie tussen het vervoerssysteem en elektriciteitsnetwerk, maar ook reistijd, laadkosten en beschikbaarheid. Er werd hier echter wel alleen gefocust op plug-in hybride elektrische voertuigen.

Een andere aanpak is toegepast door Wang, Huang, Zhang en Xia (2010). Zij gebruiken een *multi-objective planning* model om de layout van laadpunten te bepalen voor het wagenpark van elektrische voertuigen in 2010 in Chengdu, China. Hiervoor werd rekening gehouden met karakteristieken van een laadpunt zoals het bediengebied, de distributie van de laadbehoefte, karakteristieken van elektrische rijders, het elektriciteitsnetwerk en gemeentelijk planningsbeleid. Uiteindelijk is via een oplosalgoritme de layout van de laadinfrastructuur bepaald. Belangrijk aan dit model is dat het schaalbaar is, doordat alle factoren aangepast kunnen worden aan toekomstige ontwikkelingen. Ook kunnen nieuwe beïnvloedende factoren geclassificeerd worden als de situatie en het begrip rondom elektrische voertuigen verandert.

Sathaye en Kelley (2013) gebruikten *continuos facility location* modellen om de optimale locaties van publieke laadpunten te bepalen langs snelwegen nadat via een lineaire functie met twee termen (verkeer en populatie) de verwachte laadbehoefte is bepaald. Het bepalen van de optimale locaties werd gedaan door de totale afstand van laadbehoefte tot laadpunt te minimaliseren. De optimale locaties werden vervolgens weergegeven door middel van dichtheden van het aantal laadpunten per kilometer voor kleinere stukken van de snelweg, in plaats van exacte locaties en aantallen. Dit zorgt ervoor dat resultaten beter geïnterpreteerd kunnen worden door lokale beleidsmakers als er veel mogelijke locaties zijn, bijvoorbeeld door factoren zoals lokale toegankelijkheid en bewegwijzering, distributie van het elektriciteitsnetwerk of bezit van snelwegparkeerplaatsen. Sadeghi-Barzani et al. (2014) presenteerden een *mixed-integer non-linear* optimalisatie aanpak om de optimale locatie en omvang van snellaadstations langs hoofdwegen te bepalen waarmee de totale kosten geminimaliseerd worden. Hierbij werd rekening gehouden met kosten voor het realiseren van een snellader, kosten voor landgebruik en kosten voor het klaarmaken van het elektriciteitsnetwerk. Hiernaast werd er ook rekening gehouden met kosten zoals het verlies van elektriciteit als de snellader verder weg gesitueerd wordt van het onderstation (elektrisch verlies) en het verlies van elektriciteit als de snellader verder weg gesitueerd wordt van een hoofdweg (EV verlies). Dit omdat er meer elektriciteit verloren gaat als elektrische auto's een grotere omweg moeten maken om bij de snellader te komen, wat echter dan wel weer voor minder verlies zorgt door nabijheid van het onderstation. Uit de resultaten bleek dat EV verlies verantwoordelijk is voor het grootste deel van de totale kosten, gevolgd door elektrisch verlies, waardoor het volgens Sadeghi-Barzani et al. (2014) belangrijk is om deze elementen mee te nemen in de locatiebepaling doordat

de beste of goedkoopste keuze voor ontwikkelaars van laadpunten vaak juist niet de beste keuze is voor de totale kosten.

Bovengenoemde methodes bevatten echter beperkingen. Er werd bijvoorbeeld alleen gefocust op snelladers, waterstoftankstations of batterijwissellocaties, of alleen op plug-in hybrides, of juist niet op werklocaties. Methodes rondom snelladers, waterstoftankstations of batterijwissellocaties gaan er van uit dat het tanken of opladen van het voertuig vergelijkbaar is in snelheid met het tanken van een benzinevoertuig. Dit zal echter vaak niet het geval zijn bij batterij-elektrische voertuigen, kijkende naar de ratio tussen snelladers en normale laders (RVO, 2020). Er werd zodoende niet in alle gevallen rekening gehouden met de tijd die het duurt om een elektrisch voertuig op te laden, wat in het geval van een batterij-elektrisch voertuig meerdere uren kan bedragen. Daarom heeft het de voorkeur om het activiteitenpatroon van elektrische rijders mee te nemen in de bepaling van de laadpuntlocatie zodat er opgeladen kan worden op locaties waar de bestuurder meerdere uren bezig is met een activiteit en het elektrisch voertuig stilstaat (Dong et al., 2014). In Nederland komt dit voornamelijk neer op thuis- en werklocaties.

Dong et al. (2014) maakten gebruik van zo'n activiteit-gebaseerde methode om vervolgens via een optimalisatiemodel de locatie en types van de laadpunten te bepalen om het aantal gemiste elektrische voertuigkilometers of trips te minimaliseren (van BEVs), rekening houdende met een bepaald budget. In deze studie is gebruik gemaakt van reisdata van 445 benzinevoertuigen in en rondom Seattle in de VS, verzameld over een periode van 18 maanden. Gemiddeld werden er per voertuig bijna vijf trips per dag gemaakt en ongeveer 50 kilometer gereden. In deze dataset zijn verschillende zaken opgenomen, zoals de start- en eindtijd van een trip, de start- en eindlocatie van een trip, het gereisde aantal kilometer van een trip en de tijd die een voertuig geparkeerd staat op een bepaalde bestemming. Verder zijn er drie levels van laadpunten aangenomen, waar level 1 de laagste laadsnelheid en kosten heeft en level 3 de hoogste. Ook is aangenomen dat iedere elektrische rijder een level 1 laadpunt thuis heeft en hier gebruik van maakt als het voertuig langer dan één uur thuis staat geparkeerd. Vervolgens is op basis van deze gegevens met een genetisch algoritme de meest ideale locatie en type van laadpunten bepaald waar de gemiste voertuigkilometers of trips geminimaliseerd zijn voor verschillende budgetscenario's. Voor de mogelijke locaties werd gebruik gemaakt van de 500 meest populaire bestemmingen. Dit aantal werd ook aangenomen als het aantal te plaatsen laadpalen voor alle behalve het laagste budgetscenario. Bij de hogere budgetscenario's zijn er echter meer level 2 en 3 laders dan in de lagere budgetscenario's. Er werd aangenomen dat het aantal te plaatsen laadpunten pas wordt bepaald in de strategische planningsfase. Een andere tekortkoming is dat er geen rekening werd gehouden met congestie bij laadlocaties als alle laadpunten bezet zijn, mogelijk aangezien dit ten tijde van het onderzoek niet relevant was door het lage adoptieniveau. Ook werd aangenomen dat activiteitenpatronen van benzinevoertuigen niet veranderen als er geswitcht wordt naar een elektrisch voertuig, terwijl bestuurders misschien veranderen van modus of hun reisgedrag aanpassen. Shahraki et al. (2015) gebruikten ook een grote dataset van reisgegevens om de locaties van publieke laadpunten te bepalen die het aantal elektrische voertuigkilometers maximaliseren. Echter werd in dit onderzoek alleen gefocust op plug-in hybride elektrische voertuigen met een elektrische range van 160 kilometer. Ook werd er gebruik gemaakt van reisdata van bijna 12.000 taxi's over drie weken, waarvan is aangenomen dat opgeladen wordt als een taxi minimaal 15 minuten stil staat. Er is gebruikt gemaakt van een optimalisatie model om voor verschillende scenario's van aantal laadpunten te bepalen welke set locaties de gereden elektrische voertuigkilometers maximaliseert. Hiervoor zijn 1737 bestaande locaties van tankstations geselecteerd als mogelijke locaties van

laadpunten. Het bleek dat bij meer dan 40 laadpunten het aantal gereden elektrische voertuigkilometers nauwelijks meer toeneemt, waardoor werd gekozen voor 40 locaties van laadpunten. De voornaamste beperkingen van dit onderzoek waren dat er gebruik wordt gemaakt van reisdata van taxi's en dat alleen bestaande tankstations worden geselecteerd als mogelijke laadpuntlocaties. Om dit toe te kunnen passen op particuliere voertuigen zouden andere locaties moeten worden geselecteerd, alsook zou er reisdata nodig zijn van andere voertuigen.

Een soortgelijke methode is ook toegepast door Xi et al. (2013) op centraal Ohio in de VS. Hiervoor is gebruik gemaakt van reisdata verzameld in 2010 die een typische werkdag modelleert. De data bestaan uit 2,1 miljoen trips van personenvoertuigen die de gehele tour van activiteiten op een dag weergeven. Hierin zijn onder andere locaties en tijden van tripherkomst en -bestemming meegenomen, alsook de tijd dat een voertuig geparkeerd is. De herkomsten en bestemmingen zijn toegewezen aan meer dan 1800 *traffic analysis zones* (TAZs). Als mogelijke locaties voor laadpunten zijn verschillende bestemmingen binnen een TAZ geselecteerd, zoals werklocaties, winkelcentra of supermarkten. Als eerste werd vervolgens het volume van BEV trips bepaald. Dit werd gedaan door een BEV-adoptiekans te bepalen voor elke TAZ, op basis van demografische gegevens zoals inkomen, aantal voertuigen per huishouden en opleidingsniveau. In totaal werd 1% van de personenvoertuigen in de dataset een elektrisch voertuig. Daarna is via een simulatiemodel het maximumaantal elektrische voertuigen dat oplaadt bepaald als functie van het aantal laadpunten, uitgegaan van verschillende budgetscenario's. Binnen een TAZ werden in het simulatiemodel elektrische voertuigen toegewezen aan een mogelijke laadlocatie op basis van het doel van de trip. Dit geeft een veelvoud aan mogelijke laadlocaties, waaruit duidelijk werd dat werklocaties het vaakst gebruikt worden als laadlocaties, gevolgd door winkelbestemmingen. Als laatste is een lineair *integer programming* model gebruikt om de uitrol van de laadinfrastructuur te optimaliseren. Dit omdat de eerder uitgevoerde simulatie uitging van onafhankelijke locaties en er geen rekening mee hield dat een elektrisch voertuig al op een andere locatie heeft geladen. Ook kan het voorkomen dat een bestuurder van een elektrisch voertuig niet altijd laadt bij een laadlocatie door factoren zoals de prijs of de noodzaak om te laden op basis van de verder af te leggen afstand op een dag. Daarom is er aangenomen dat een bestuurder alleen probeert op te laden als dit nodig is om de verdere trips van zijn dag te kunnen uitvoeren. Door deze elementen kon de verwachte laadbehoefte worden overschat in het simulatiemodel. Echter bleek dat deze overschatting maar 3,5% bedraagt, wat laat zien dat de simpelere simulatiemethode relatief accuraat is doordat de meeste elektrische voertuigen maar maximaal één keer per dag gebruikmaken van een publiek laadpunt. Daarnaast is er aangenomen dat elke bestuurder van een elektrische auto een privé laadpunt thuis heeft, waardoor de publieke laadbehoefte minder is dan het geval zou zijn in Nederland (waar een privé laadpunt vaker juist niet mogelijk is).

González et al. (2014) gebruikten ook activiteitendata in een activiteiten-gebaseerd transportmodel, om vervolgens voor Vlaanderen (België) via een optimalisatiealgoritme de optimale laadlocaties van normale laadpunten te bepalen waar activiteiten worden uitgevoerd en het voertuig stil staat. Het activiteiten-gebaseerd transportmodel voorspelde het dagelijkse activiteitenschema voor elke bestuurder in Vlaanderen, waarbij gekeken werd naar het type activiteit, de start- en eindtijd, de start- en eindlocatie, de afgelegde afstand en de gebruikte modus. In dit model is vervolgens onderzocht hoeveel van de 1,1 miljoen voertuigen in Vlaanderen hun dagelijkse schema kunnen uitvoeren zonder tijdens de dag bij te laden. Er is aangenomen dat iedere bestuurder in Vlaanderen gebruik maakt van een Nissan Leaf met een toentertijd gemiddelde batterijcapaciteit, bereik en verbruik. Ook laadde elke bestuurder elke nacht thuis zijn voertuig volledig op. Het blijkt dat 81% van de voertuigen in Vlaanderen in dit geval geen behoefte

heeft aan publieke laadinfrastructuur, 11% kon zijn dagelijkse schema alleen voltooien als er in de tussentijd wordt opgeladen op activiteitenlocaties en 8% moest wel zijn dagelijkse schema aanpassen om ergens te gaan opladen, zoals bij een snellader. Vervolgens is via een optimalisatiemodel bepaald waar en wanneer de voertuigen die bijgeladen moesten worden tijdens de dag kunnen opladen. Hiervoor is Vlaanderen opgedeeld in meer dan 2000 *Traffic Analysis Zones* (TAZs) en ook is er rekening gehouden met de variabele elektriciteitsprijs over de dag. Er is aangenomen dat de voertuigen die moeten bijladen dit kunnen doen in een TAZ waar een activiteit wordt uitgevoerd en meerdere uren hiervoor beschikbaar zijn. Deze analyse liet zien dat er bepaalde TAZs waren die een hogere laadbehoefte (in kWh of aantal laadsessies) ervaarden dan anderen, waardoor bekend is waar er eerder meer laadpunten nodig zijn. Ook is gekeken naar het type activiteit waarbij het meest bijgeladen kon worden, wat thuislocaties zijn, gevolgd door de werklocaties. Alhoewel dit onderzoek duidelijk laat zien hoeveel voertuigen moeten bijladen en waar en wanneer zij dit kunnen doen, is de voornaamste beperking het feit dat wordt aangenomen dat iedere bestuurder beschikking heeft over een privé laadpunt aan huis. In een realistischere situatie is dit niet het geval aangezien een substantieel deel van de bevolking geen beschikking heeft over een eigen oprit of garage, wat ervoor zou zorgen dat er meer voertuigen zouden zijn die over de dag moeten bijladen om hun dagelijkse schema te voltooien.

Knapen, Kochan, Bellemans, Janssens & Wets (2012) gebruikten ook een activiteiten-gebaseerd model. Echter werd dit gebruikt om de elektrische energievraag te bepalen voor Vlaanderen door het dagelijkse activiteitenschema te voorspellen voor alle bestuurders. Hierbij is aangenomen dat de laadlocaties ofwel thuis zijn, ofwel bij het werk en dat iedereen thuis oplaadt en in sommige gevallen op het werk. Ook worden normale laadpunten aangenomen en geen snelladers. Van de voertuigen is aangenomen dat deze elektrisch zijn, waarbij deze op basis van huidige marktaandelen van kleine, middelgrote en grote auto's werden verdeeld onder een verschillende batterijcapaciteit en bereik (variërend van 100 tot 180 kilometer). Ook werden de voertuigen onderverdeeld in bedrijfs- en privévoertuigen. Van alle voertuigen in trips die geen werkactiviteit hadden wordt aangenomen dat dit privévoertuigen zijn. Van alle voertuigen in trips die wel een werkactiviteit hadden wordt aangenomen dat 10% hiervan een bedrijfsvoertuig is, de rest is privé. Van deze bedrijfsvoertuigen werd vervolgens aangenomen dat 50% op de werklocatie kan laden. Ook werden er kansen toegewezen of het voertuig een BEV of PHEV is. In verschillende scenario's over wanneer bestuurders beginnen met opladen (bij lage kosten, bij elke thuiskomst of bij de laatste thuiskomst) werd vervolgens de energiebehoefte bepaald en hoe deze fluctueert over een dag. Daarnaast werd duidelijk dat 78% van de gereden dagelijkse afstand op een werkdag haalbaar is met een BEV onder de huidige marktaandelen van kleine, middelgrote en grote voertuigen. Verder bleek dat de huidige nachtelijke dalperiode voor laden lang genoeg is om de energiebehoefte te distribueren over de tijd zodat er geen ongewenste laadpieken zijn. Dit liet zien dat het opladen van een elektrische voertuigvloot in Vlaanderen mogelijk is met de huidige energievoorziening, mits deze wordt verdeeld over de dag. Voor de locatiebepaling is er echter, net als in het onderzoek van González et al. (2014), van uitgegaan dat iedere bestuurder de mogelijkheid heeft om thuis op te laden bij een privé laadpunt, wat in een realistische situatie lang niet altijd het geval is.

Een andere aanpak werd gehanteerd door van Montfort et al. (2016). Zij gebruikten multipele regressie om de laadpaalbehoefte voor bewoners- en bezoekersladen te voorspellen in de regio Den Haag, Nederland. Voor het bewonersladen zijn gegevens op postcodevijf-niveau gebruikt, wat een gebied is dat groter is dan een straat, maar kleiner dan een buurt. Als afhankelijke variabele is gekozen voor het aantal unieke elektrische auto's dat per dag gebruik maakt van een publiek laadpunt in een specifiek

postcodevijf-gebied en waarvan de laadpashouders in de nabijheid van dit laadpunt wonen. Hiervoor is gebruikt gemaakt van een database met locatiegegevens van laadpunten en van een database van de gemeente met laadgegevens van alle publieke laadpunten in Den Haag. Deze database bevatte meer dan 100.000 laadsessies over drie jaar en hiervan werd aangenomen dat elke gebruiker één laadpas betreft. Vervolgens werd deze database ingeperkt door laadpassen te elimineren die minder dan zes keer per maand bij hetzelfde laadpunt hebben geladen, alsook laadsessies die tussen vier uur 's nachts en vier uur 's middags zijn gestart. Dit om woonverkeer te scheiden van incidentele bezoekersstromen. Hierdoor bleef een selectie over van 796 verschillende laadpassen. Daarna is voor elk laadpunt een verzorgingsgebied met een radius van 200 meter gedefinieerd en vervolgens zijn de laadpassen die vaak gebruik maakten van een bepaald laadpunt verdeeld over de postcodevijf-gebieden die overlap hebben met het verzorgingsgebied van het laadpunt. Dit leidde tot een database waarin voor elk postcodevijf-gebied is weergegeven hoeveel unieke elektrische voertuigen (of laadpassen) laden per dag. Voor de onafhankelijke variabelen is gekozen voor het gemiddelde huishoudinkomen per postcodevijf-gebied en het huidige aantal auto's per postcodevijf-gebied. Omdat elektrische auto's in de regel duur zijn, bepaalt het huishoudinkomen of de middelen aanwezig zijn om er een aan te schaffen. Het huidig aantal auto's werd gebruikt als indicatie voor het toekomstig aantal elektrische auto's omdat is aangenomen dat een persoon een elektrische auto aanschaft als hij momenteel al de behoefte heeft aan een (benzine)auto. De uitgevoerde regressie liet zien dat beide onafhankelijke variabelen een hoge significantie hebben en dus met een grote zekerheid een positief verband hebben met het aantal unieke elektrische auto's dat per dag gebruik maakt van een publiek laadpunt. Dit liet zien dat gebieden met een hoog huishoudinkomen en een groot aantal auto's zorgt voor een grotere laadbehoefte in de toekomst. Ook is dit model vervolgens toe te passen op andere locaties als de onafhankelijke variabelen worden ingevuld in de regressievergelijking. Er werd echter geen rekening gehouden met opladen op werklocaties en ook niet met activiteitenpatronen en de tijd die het duurt om een auto op te laden. Daarnaast werd de uitkomst gegeven in het aantal unieke auto's dat laadt per dag. Daarom is het voornamelijk geschikt om een indicatie te geven over in welke gebieden een hogere laadbehoefte wordt verwacht, en dus niet voor exacte voorspellingen over het aantal laadpunten.

Voor het voorspellen van bezoekersladen werd gekeken naar categorieën van *Points of Interest* (POIs) die invloed hebben op het laadgedrag van bezoekers. Er werd dus enkel gekeken naar het aantal en type POIs, zoals buitenrecreatie, sport, attractie, evenement, winkelen, cultuur of horeca. Bezoek aan familie of vrienden is buiten beschouwing gelaten. Uit de database van laadgegevens werden alleen laadsessies meegenomen waarvan de laadpas tien keer of minder op hetzelfde laadpunt heeft geladen en waarvan de sessie minder dan vier uur duurde. Dit om de bezoekersstromen te scheiden van het woonverkeer. Vervolgens is voor elke laadpaal bepaald welke en hoeveel POIs binnen het verzorgingsgebied van 500 meter liggen. Daarna is een multipele regressie uitgevoerd met het aantal laadsessies van bezoekers als afhankelijke variabele en de verschillende types POIs die bezoekers trekken als onafhankelijke variabelen. Van de 18 gedefinieerde types POIs blijkt dat er vijf een significant en positief verband hebben met het aantal laadsessies. Dit zijn winkelcentra, museums, bars, casino's en restaurants. De regressie geeft een indicatie dat bij deze types POIs het aantal publieke laadpunten zou kunnen worden verhoogd.

3. Methodologie

Voor dit rapport van de Masterproef is een tweeledig onderzoek uitgevoerd; een literatuurstudie en een modelberekening en analyse. In dit deel wordt het ontwerp van het onderzoek besproken, alsook hoe de data verzameld en geanalyseerd is. Eerst wordt het deel van de literatuurstudie besproken, gevolgd door de aanpak van de voorspelling van de laadbehoefte via modelberekening en analyse en hoe de scenario's hiervoor zijn opgebouwd.

3.1 Literatuurstudie

Voor het eerste deel van de Masterproef is een literatuurstudie uitgevoerd om het onderzoek te kaderen door te kijken naar de opkomst en huidige situatie van elektrisch vervoer in Nederland, naar wat er bekend is over prognoses van het aantal elektrische voertuigen, naar plaatsingsbeleid van laadpalen, naar activiteiten-gebaseerde modellen en naar wat er bekend is over het bepalen van de laadbehoefte en -locatie. Hiervoor zijn verschillende bronnen en rapporten geraadpleegd van overheidsinstanties zoals de RVO en het CBS, instituten zoals de ANWB of ElaadNL, of nieuwsorganisaties om recentere ontwikkelingen weer te geven zoals de NOS en de Volkskrant. Voor de laatste twee onderdelen in het theoretisch kader zijn echter voornamelijk wetenschappelijke artikels geraadpleegd die gezocht zijn via Google Scholar en Scopus. De gebruikte literatuur is geselecteerd op basis van relevantie en kwaliteit door te kijken naar het aantal referenties dat het artikel heeft, hoeveel andere publicaties de auteur op zijn of haar naam heeft staan en of het is uitgegeven in een toonaangevend vaktijdschrift. De verschillende bronnen en artikels zijn gescand op relevantie en vervolgens is hieruit het theoretisch kader opgesteld.

3.2 Voorspelling laadbehoefte en -locatie

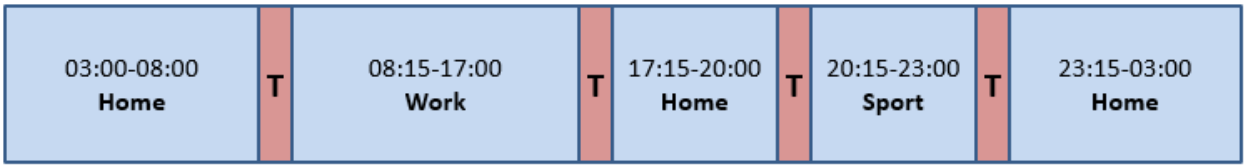
In dit onderdeel wordt weergegeven hoe het ontwerp van de methode ten behoeve van het voorspellen van de toekomstige laadbehoefte en -locatie eruitziet. Dit is gedaan door enkele toekomstscenario's te analyseren via de output dataset van het FEATHERS activiteiten-gebaseerd transportmodel met als focus de stad Rotterdam. Ten eerste wordt ingegaan op het ontstaan en de werking van het model, alsook hoe de dataset eruitziet en welke factoren deze bevat. Ook wordt een overzicht gegeven van het gemodelleerde gebied in de gemeente Rotterdam, dat in het model ingedeeld is in 1.383 verschillende zones. Daarna wordt stapsgewijs de methode besproken en hoe de scenario's bij elke stap zijn opgesteld. Uiteindelijk wordt nog een overzicht gegeven van de verschillende scenario's die geanalyseerd zijn.

3.2.1 FEATHERS-model

FEATHERS (*Forecasting Evolutionary Activity – Travel of Household and their Environmental RepercussionS*) is een activiteiten-gebaseerd transportmodel dat sinds 2010 in ontwikkeling is door het Instituut voor Mobiliteit (IMOB), gelieerd aan de Universiteit Hasselt. Het model is opgebouwd op verzamelde verplaatsingsdata en voorspelt hieruit de vervoersvraag voor één dag door voor elke persoon te voorspellen welke activiteiten hij uitvoert, op welke locatie, hoe lang en met welke modus, rekening houdend met tijdelijke, ruimtelijke, huishoudelijke, situationele en institutionele beperkingen en situaties. In het model wisselt een persoon verschillende taken af. Tijdens de planningstaak maakt een persoon zijn schema van activiteiten en verplaatsingen die hij gaat uitvoeren. Vervolgens wordt dit schema uitgevoerd, echter is deze simulatie een stochastisch proces omdat er onverwachte gebeurtenissen kunnen plaatsvinden, zoals vertraging tijdens de verplaatsing of tijdens de activiteit. Het bijleren is de derde taak die uitgevoerd wordt zodat een persoon kan leren en bijsturen ten gevolge van deze nieuwe informatie (Bellemans et al., 2009).

Het FEATHERS-model is modulair opgebouwd, wat inhoudt dat verschillende functionaliteiten eenvoudig kunnen worden verwisseld of veranderd. In totaal zijn er zeven modules te onderscheiden. De configuratiemodule beheert alle modules en voorziet deze van de benodigde instellingen. De datamodule beheert alle data die nodig is om de omgeving waarin personen gesimuleerd worden te beschrijven en stelt deze ter beschikking aan andere modules, zoals data over transportnetwerken, landuse-data of het aantal scholen en werklocaties. Ook beheert de datamodule de data die het model kalibreert, wat bestaat uit de verzamelde verplaatsingsdata bevraagd uit een steekproef van personen. De populatiemodule beheert alle personen tijdens de simulatie en houdt bijvoorbeeld bij welke activiteiten en verplaatsingen gepland en uitgevoerd worden, welke attributen elke persoon heeft of tot welk huishouden personen behoren. De schedulemodule bevat de verschillende algoritmes die bepalen hoe een persoon op basis van beschikbare informatie een agenda van uit te voeren activiteiten en verplaatsingen samenstelt. De schedule-uitvoermodule simuleert simultaan de uitvoering van de agenda's van alle personen, zowel voor de uitvoering van activiteiten als verplaatsingen. De learningmodule bevat algoritmes die het verschil tussen de verwachte en ervaren reistijd gebruiken om de kennis van personen over hun omgeving bij te stellen. De statistische module genereert interpreteerbare statistieken uit de grote hoeveelheid dagboekgegevens van de simulatie, zoals gemiddelde triplengtes of herkomst-bestemmingsmatrices (Bellemans et al., 2009).

Binnen de schedulemodule wordt gebruik gemaakt van verschillende algoritmes die de keuzes van een persoon simuleren, zoals welke modus gebruikt wordt of welke activiteit op welke locatie wordt uitgevoerd. Deze algoritmes bestaan uit keuzebomen en discrete keuzemodellen en zijn opgebouwd uit de verzamelde verplaatsingsgegevens, zoals besproken in deel 2.2. FEATHERS gebruikt een keuzeboom voor de keuzes voor de activiteit, de activiteitsduur en de vertrektijd voor elke trip. Voor de keuze van de bestemming en de modus wordt een discreet keuzemodel gebruikt. Binnen het model worden met deze algoritmes de activiteiten in een bepaalde volgorde gesimuleerd. Eerst wordt een primaire activiteit bepaald, met daaromheen geen, één of meerdere secundaire activiteiten. Dit kunnen activiteiten zijn die op vaste momenten worden uitgevoerd of flexibele activiteiten. Op deze manier wordt per persoon een tour van activiteiten voorspeld voor één dag van 24 uur (de Romph et al., 2018). Zie figuur 11 voor een voorbeeldschema.



Figuur 11: voorbeeld tourschema van FEATHERS

3.2.2 Output FEATHERS Rotterdam

Het runnen van een simulatie binnen FEATHERS duurt meerdere uren. Vervolgens is de output beschikbaar in de vorm van een omvangrijke dataset die elke trip bevat die uitgevoerd is in het simulatiegebied over 24 uur. Deze dataset bevat meerdere factoren over de trip- en activiteitkenmerken, alsook socio-demografische data van de persoon die de trip uitvoert. In totaal zijn er 21 variabelen weergegeven in de output van FEATHERS voor het simulatiegebied, zie tabel 8. Dit simulatiegebied in FEATHERS bestaat uit de stadsregio Rotterdam, welke een groter gebied bevat dan de gemeente Rotterdam. FEATHERS heeft zodoende de trips voorspeld van inwoners van de stadsregio Rotterdam. In

het volgende onderdeel (sectie 3.2.3) wordt beschreven hoe dit gebied omgezet is naar de gemeente Rotterdam en hoe vervolgens met een compensatiefactor is gewerkt.

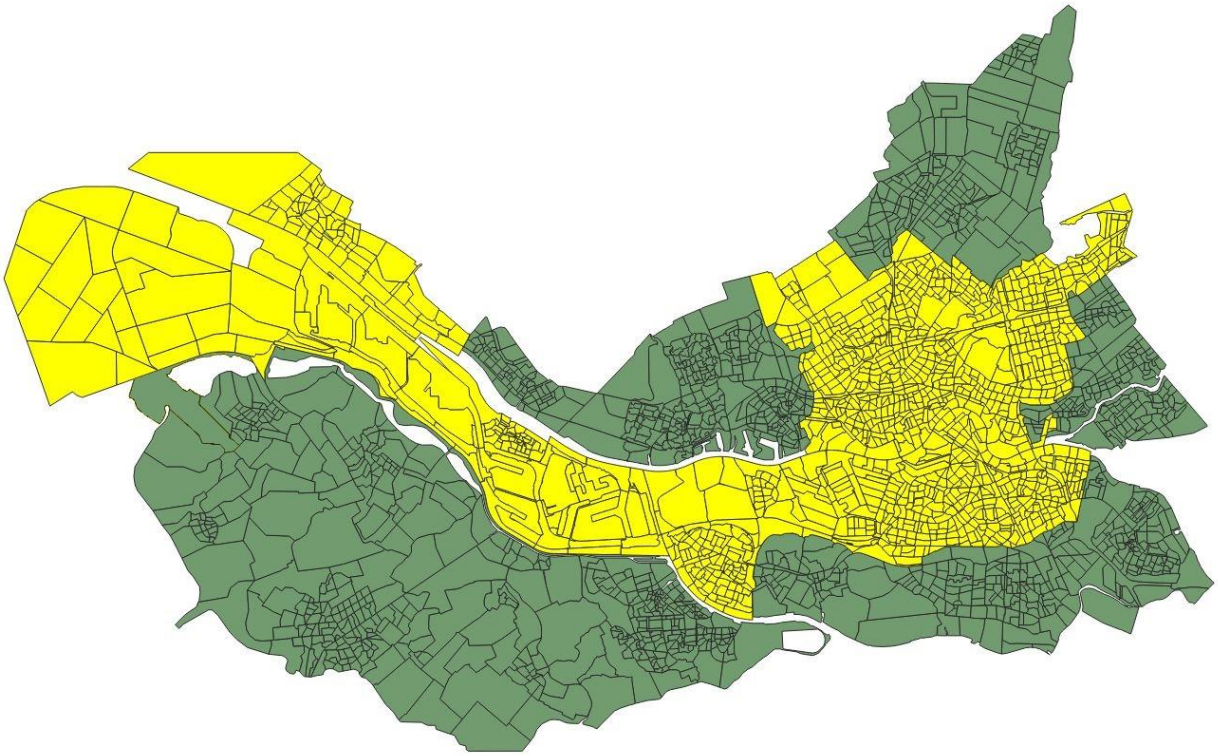
Tabel 8: variabelen in FEATHERS

Variabele	Betekenis
Persoon ID	Uniek persoonsnummer
Activiteit type	Type activiteit die gaat worden uitgevoerd (werk, vrijetijd, slaap, etc.)
Activiteit locatie	Locatie waar de activiteit gaat worden uitgevoerd
Activiteit starttijd	Tijd waarop de activiteit begint
Activiteit duur	Duur van de activiteit
Transportmodus	Modus waarmee naar de activiteit wordt verplaatst (Auto, OV, fiets, etc.)
Trip begin	Beginlocatie van de trip
Trip bestemming	Eindlocatie van de trip
Trip starttijd	Tijd waarop de trip begint
Trip duur	Duur van de trip
Leeftijd	Leeftijd van de persoon (in 5 categorieën)
Rijbewijs	Persoon in bezit van rijbewijs (wel of niet)
Opleidingsniveau	Hoogst genoten opleiding (in 4 categorieën)
Geslacht	Man of vrouw
Huishoudsamenstelling	Huishouden met 1 persoon of een koppel met/zonder kinderen
Huishoudinkomen	Inkomen van het gehele huishouden (in 3 categorieën)
Huishouden aantal auto's	Auto's van het gehele huishouden (in 4 categorieën)
Aantal uur betaald werk	Aantal uur dat de persoon betaald werk uitvoert per week (in 4 categorieën)
Herkomst persoon	Herkomst van de persoon (in 3 categorieën)
Student OV kaart	Aanwezigheid van student OV kaart (niet, week of weekend)
Stedelijkheid	Mate van stedelijkheid (in 5 categorieën)

Het FEATHERS-model bevat een groot aantal zones in Nederland en is met name gefocust op de regio Rotterdam en Den Haag. Hiervoor is in dit gebied een veel grotere dichtheid in zones dan in de rest van Nederland zodat met grotere accuraatheid trips voorspeld kunnen worden, zie figuur 12. Voor dit onderzoek zijn vervolgens de activiteiten en trips voorspeld voor de stadsregio Rotterdam. Deze stadsregio bevat 2.887 verschillende zones en bevat naast het havengebied ook enkele omringende gemeenten. Deze agglomeratie heeft ongeveer 1,2 miljoen inwoners. De focus van dit onderzoek ligt echter op de gemeente Rotterdam, wat ongeveer de helft van het aantal inwoners bevat in vergelijking met de stadsregio. In QGIS is een selectie gemaakt van de zones die niet bij de gemeente Rotterdam horen door gebruik te maken van de GIS kaart

Figuur 12: overzicht zones NL in FEATHERS

Territoriale Indeling Rotterdam, welke publiek beschikbaar wordt gesteld door de gemeente Rotterdam (Gemeente Rotterdam, 2020a). Van de 2.887 zones in de stadsregio behoren er 1.383 bij de gemeente Rotterdam. Zie figuur 13 voor het overzicht van de zones in de stadsregio (groen en geel) en de gemeente Rotterdam (geel). De overige 1.505 zones zijn, nadat de analyse is uitgevoerd, uiteindelijk verwijderd uit de data om zo tot een dataset van de gemeente Rotterdam te komen. Zie hiervoor sectie 3.2.3.



Figuur 13: zones in FEATHERS-model voor stadsregio (groen en geel) en gemeente Rotterdam (geel)

3.2.3 Data-analyses en scenario's

De output dataset van het FEATHERS activiteiten-gebaseerd transportmodel van de stadsregio Rotterdam is gebruikt om verschillende berekeningen en eliminaties uit te voeren en zo een aantal toekomstige scenario's te analyseren. Hiervoor is gebruikt gemaakt van een script dat verschillende stappen uitvoert en berekeningen doet met de dataset van stadsregio Rotterdam om uiteindelijk de laadbehoefte per zone en in totaal te bepalen. Dit script is meerdere keren uitgevoerd met verschillende inputwaardes om zo de verschillende scenario's te analyseren. Hieronder wordt stapsgewijs ingegaan op welke berekeningen gedaan zijn, de gebruikte scenario's en hoe deze scenario's zijn opgesteld.

Er zijn drie toekomstige adoptiescenario's opgesteld voor de gemeente Rotterdam; voor 2025, 2030 en 2035. Binnen elk van deze adoptiescenario's zijn verschillende aannames gemaakt die ten tijde van elk scenario het meest waarschijnlijk werden geacht, al dan niet ondersteund met data. Deze drie adoptiescenario's bevatten ten eerste het toekomstig aantal (volledig) elektrische voertuigen in de gemeente Rotterdam. Deze aantallen zijn gebaseerd op de prognoses van ElaadNL en Hoekstra, zoals besproken in deel 2.1. Deze prognoses gelden echter voor heel Nederland. Daarom is de verhouding van populaties tussen gemeente Rotterdam en Nederland gebruikt om de prognoses om te rekenen naar aantallen die gelden voor de gemeente Rotterdam (CBS, 2020). Hiervoor is gebruik gemaakt van het

gemiddelde van het middenscenario van ElaadNL en de prognose van Hoekstra. In aantallen komt dit ongeveer uit op respectievelijk 33.000, 86.000 en 150.000 volledig elektrische voertuigen in de gemeente Rotterdam in 2025, 2030 en 2035, waardoor de laadbehoefte voorspellingen voor deze jaartallen uitgaan van de genoemde adoptiecijfers.

Omdat dit onderzoek zich richt op de publieke laadbehoefte moet er rekening worden gehouden met het feit dat een deel van de populatie thuis een privé laadpunt kan realiseren bij hun oprit of in hun garage en dus geen publieke laadbehoefte ervaart ten gevolge van hun dagelijkse vervoersvraag. Eerder in dit onderzoek is genoemd dat in Nederland 57,5% van de woningen bestaan uit appartementen en tussenwoningen, waar dus geen mogelijkheid is tot realisatie van een eigen laadpunt. Voor een hoog stedelijk gebied zoals Rotterdam is dit percentage groter. Echter is deze data van Rotterdam niet openbaar toegankelijk. Utrecht is een andere grote stad die betreft omgevingsadressendichtheid het dichtst bij Rotterdam ligt. Als van Utrecht wordt aangenomen dat alleen vrijstaande en 2onder1-kap woningen een privé laadmogelijkheid hebben, komt dit neer op 3,3% van de huishoudens (CBS, 2020; Gemeente Utrecht, 2020). Voor gebieden met hoge stedelijkheid, zoals Rotterdam en Utrecht, bedraagt de mogelijkheid tot privé laden zodoende een erg laag percentage, waardoor de invloed hiervan ook erg laag is. Daarom is gekozen om hier in dit onderzoek geen rekening mee te houden. Zou dit onderzoek echter gefocust zijn op een landelijk gebied met een lagere mate van stedelijkheid, dan zouden de woningen met een privé laadmogelijkheid wel verwijderd moeten worden uit de data aangezien dit dan een significantere impact zal hebben.

Het aantal elektrische voertuigen dat aangenomen is in de adoptiescenario's is vervolgens toegewezen aan een groep benzineauto rijders, waarvan is aangenomen dat hun activiteitenpatroon niet verandert door het switchen naar een elektrisch voertuig. Het is echter onbekend hoe de adoptie van elektrische voertuigen exact verloopt. Wel is uit onderzoek bekend dat personen met bepaalde kenmerken vaker geïnteresseerd zijn in elektrische auto's. Geïnteresseerden zijn namelijk vaker man, bovengemiddeld vaak hoog opgeleid, vaker wonend in grote steden en hebben vaker een groter budget beschikbaar (ANWB, 2018). Ook kan het huidig aantal auto's een indicatie zijn voor het toekomstig aantal elektrische auto's (van Montfort et al., 2016). Om toch rekening te houden met deze factoren zijn per adoptiescenario verschillende personen met bepaalde kenmerken verwijderd uit de dataset. Daarna is aan de overgebleven benzineauto rijders willekeurig een bepaald aantal elektrische voertuigen toebedeeld, zoals opgesteld in de adoptiescenario's. Dit om toch enige willekeur toe te voegen aangezien elektrische voertuigen niet alleen worden gekocht door, bijvoorbeeld, mensen met een hoog inkomen. Dit willekeurig selecteren heeft wel als gevolg dat niet exact de prognose aantallen behaald worden doordat een willekeurige trekking met een bepaald aantal als doel niet exact kan zijn in FEATHERS, echter zorgt dit aar voor een verwaarloosbaar aantal minder elektrische voertuigen. In de adoptiescenario's zijn als eerste alle personen uit de dataset verwijderd die geen auto als modus hebben, alsook alle personen onder de 18 jaar. Voor het 2025 scenario zijn daarnaast nog de volgende personen verwijderd; personen zonder rijbewijs, personen met het laagste opleidingsniveau, personen met de laagste twee inkomensniveaus en personen met 0 of 1 auto's per huishouden. Voor het 2030 scenario geldt dit voor personen zonder rijbewijs, personen met het laagste inkomensniveau en personen zonder auto's in hun huishouden. Voor het 2035 scenario zijn verder geen personen verwijderd uit de dataset. Voor de scenario's die verder in de toekomst liggen zijn zodoende minder personen verwijderd uit de dataset omdat wordt aangenomen dat de prijs van elektrische voertuigen zal blijven dalen en deze daardoor voor steeds meer personen betaalbaar worden.

Er bestaat echter variatie in elektrische modellen en hun bereik en verbruik, welke invloed hebben op de laadbehoefte. Ook is onzeker hoe dit elektrische wagenpark er in de toekomst zal uit zien, zowel qua verhoudingen als qua type modellen. Daarom is niet een wagenpark van verschillende elektrische voertuigen toegewezen, maar is per adoptiescenario een elektrisch voertuig met gemiddeld bereik en verbruik aangenomen die aan elke elektrische rijder is toegewezen. Dit gemiddelde bereik en verbruik is gebaseerd op de momenteel tien meest voorkomende elektrische modellen in Nederland (RVO, 2020). Voor de scenario's die verder in de toekomst liggen is dit gemiddelde bereik verhoogd, aangezien het in de lijn der verwachting ligt dat batterijtechnologie en capaciteit blijven verbeteren. Het verbruik wordt echter gelijk gehouden omdat dit sinds de introductie van elektrische voertuigen in 2010 nauwelijks is veranderd. Dit bedraagt 0,1678 kWh/km (EV Database, 2020). In het scenario van 2025 zou een bereik gelden van 300km, en voor elk volgend scenario zou dit verhoogd worden met 50km. Echter bleek dat zelfs het kleinste bereik voldeed aan de vervoersvraag over één dag van zo goed als alle personen met een BEV in FEATHERS. Daarom is in dit onderzoek verder geen rekening gehouden met het bereik van de voertuigen.

Nadat alle elektrische voertuigen zijn toegewezen aan personen in Rotterdam is bepaald dat een deel van deze groep thuis oplaadt en een deel op werk, aangezien dit de voornaamste plaatsen zijn in de normale dagelijkse routine waar men vaak de mogelijkheid heeft om de energiebehoefte die hieruit voortkomt te voldoen. De focus ligt alleen op de laadbehoefte die voortkomt uit het zogenoemde bewonersladen. Bezoekersladen, wat de laadbehoefte is die voortkomt uit incidentele verplaatsingen en voornamelijk bij snelladers wordt voldaan, is niet meegenomen. Er is bekend dat men de voorkeur heeft om thuis op te laden (Spoelstra, 2014). Ook is dit te zien aan het veel grotere aantal privé laadpunten ten opzichte van het aantal publieke laadpunten (RVO, 2020). Om met dit effect rekening te houden is binnen elk adoptiescenario uitgegaan van drie verschillende locatiescenario's, waarbinnen willekeurig een groep thuis- en werkladers is bepaald. De groep werkladers is vervolgens verwijderd uit de data. Hierbij is de aanname dat deze groep bij werk oplaadt en niet in de buurt van thuis, en daarom geen publieke laadbehoefte heeft. In het eerste locatiescenario is uitgegaan van 80% thuisladers en 20% werkladers. De twee alternatieve locatiescenario's bevatten respectievelijk 60% thuisladers en 40% werkladers, en 40% thuisladers en 60% werkladers. Een persoon met een elektrisch voertuig in de thuisladers groep zal zijn voertuig altijd willen opladen als hij thuis is bij een publieke laadpaal in de zone waar zijn thuislocatie zich bevindt.

Vervolgens is voor de groep van thuisladers per persoon met een elektrisch voertuig en voor elk scenario bepaald wat de energiebehoefte in kWh per uur is over een dag van 24 uur en in welke zone deze wordt voldaan. Hiervoor is gekeken hoeveel kilometer elke persoon met een elektrisch voertuig rijdt op een dag, wat vervolgens via het verbruik wordt omgezet naar een energiebehoefte in kWh per uur. Deze energiebehoeftes voor alle personen zijn vervolgens per zone en per uur geaggregeerd om tot een dataset te komen die voor elke zone de energiebehoefte over een dag van 24 uur weergeeft. Alle zones samen bepalen dan de totale laadbehoefte over 24 uur in Rotterdam. Dit is uitgevoerd voor elk van de in totaal negen scenario's, om zo de effecten van de variërende scenario's te kunnen inzien.

Deze verkregen dataset met energiebehoeftes over één dag voor Rotterdam is gebaseerd op de stadsregio Rotterdam, zoals eerder beschreven. De gemeente Rotterdam maakt hier onderdeel van uit. De prognose-aantallen van elektrische voertuigen in de drie adoptiescenario's zijn echter toegewezen aan personen in de stadsregio Rotterdam, niet de gemeente. Om tot de laadbehoeftes voor de gemeente Rotterdam te komen, zijn eerst in QGIS alle zones bepaald die niet tot de gemeente Rotterdam behoren. Deze zones

zijn vervolgens verwijderd uit de dataset met laadbehoeftes over de dag per zone. Om vervolgens tot een macroscopisch correcte laadbehoefte te komen voor de gemeente Rotterdam is een compensatiefactor toegepast op elke laadbehoefte, gebaseerd op de populatieverhouding tussen de stadsregio en de gemeente Rotterdam, zoals gebruikt in FEATHERS. Aangezien elk persoon met een elektrisch voertuig willekeurig is geselecteerd, is het macroscopisch gezien mogelijk om een compensatiefactor toe te passen om tot een dataset te komen welke de laadbehoeftes weergeeft voor de gemeente Rotterdam.

Uit deze data van de laadbehoeftes per zone over de dag zijn vervolgens geaggregeerde grafieken opgesteld die duidelijk weergeven wat de laadbehoefte over de dag bedraagt, zowel in totaal voor Rotterdam als per zone. Ook is via QGIS de data per zone afgebeeld in een heatmap, welke duidelijk weergeeft waar in Rotterdam de laadbehoeftes zich concentreren.

3.2.3 Scenario overzicht

Tabel 9: Overzicht alle scenario's voor Rotterdam

	2025 Scenario			2030 Scenario			2035 Scenario		
Aantal BEVs	33.675			86.063			149.667		
BEVs random toewijzen na eliminatie van	- Alle modi behalve auto - Leeftijd < 18j - Geen rijbewijs - Laagste opleidingsniveau - Laagste 2 inkomensniveaus - 0 en 1 auto's per huishouden			- Alle modi behalve auto - Leeftijd < 18j - Geen rijbewijs - Laagste inkomensniveaus - 0 auto's per huishouden			- Alle modi behalve auto - Leeftijd < 18j		
Bereik / verbruik BEV	300km	0,1678kWh/km		350km	0,1678 kWh/km		400km	0,1678 kWh/km	
Locatiescenario's thuis/werk laden	80/20	60/40	40/60	80/20	60/40	40/60	80/20	60/40	40/60

4. Resultaten

In dit onderdeel worden de resultaten besproken, oftewel de uitkomsten van de voorspellingen van het FEATHERS-model, waaruit vervolgens de toekomstige laadbehoeftes voor de gemeente Rotterdam zijn bepaald. Dit wordt gedaan aan de hand van de verschillende opgestelde scenario's. Als eerste wordt adoptiescenario van 2025 besproken, gevolgd door de scenario's voor 2030 en 2035. Bij elk adoptiescenario worden ook de alternatieve locatiescenario's besproken, die het effect weergeven van meer personen die op het werk laden en zodoende geen publieke laadbehoefte ervaren.

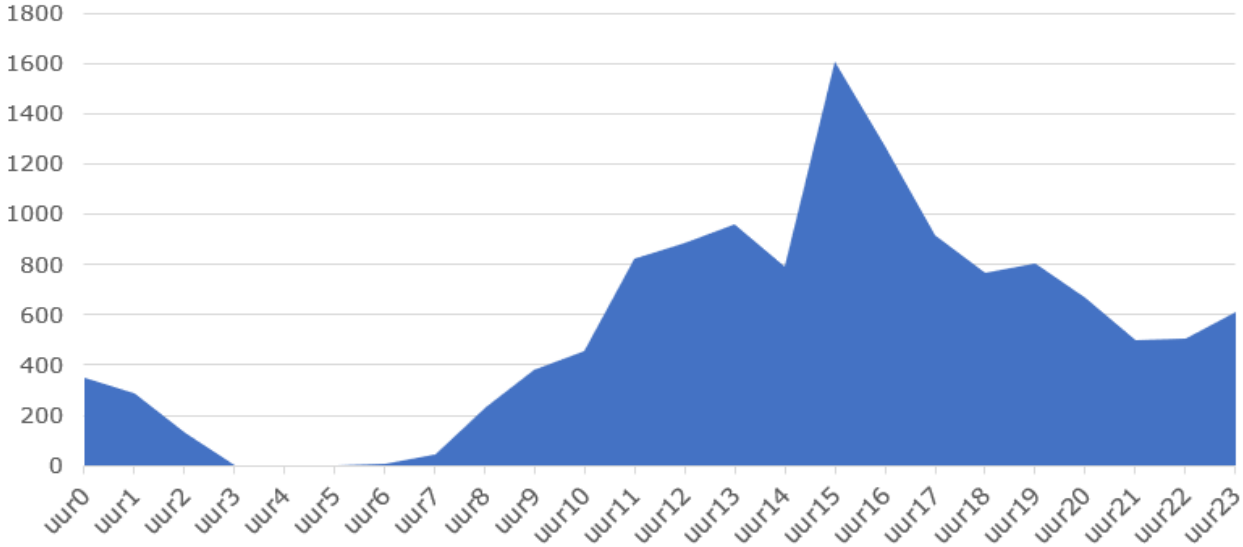
4.1 Adoptiescenario 2025

Het adoptiescenario voor 2025 wordt gekenmerkt doordat hier het minste aantal volledig elektrische voertuigen is toegewezen aan personen in Rotterdam in vergelijking met de andere scenario's, aangezien dit scenario zich het minst ver in de toekomst bevindt. In dit scenario wordt uitgegaan van 33.675 elektrische voertuigen die willekeurig zijn toegewezen aan geselecteerde personen in Rotterdam. Hiervan bestaat een deel uit werkladers, welke willekeurig zijn verwijderd uit de data. Van hoeveel personen is aangenomen dat zij bij werk laden en zodoende geen publieke laadbehoefte ervaren is uiteengezet in de drie verschillende locatiescenario's. Het eerste locatiescenario gaat uit van 20% werkladers, en de twee alternatieve locatiescenario's gaan respectievelijk uit van 40% en 60% werkladers.

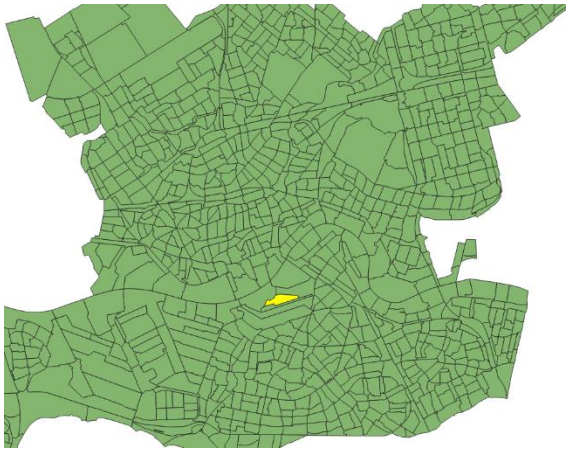
4.1.1 Locatiescenario 80% thuisladers

Als eerste wordt het scenario besproken waarbij de thuisladers 80% bedragen en waar de verwijderde werkladers groep 20% bedraagt. Grafiek 11 laat de laadbehoefte over een gemodelleerde dag in FEATHERS zien, in totaal voor de gemeente Rotterdam. Er is te zien dat er zich een piek bevindt tussen 15u en 16u 's middags van 1.607 kWh per uur aan gevraagde energie, die zich begint op te bouwen vanaf ongeveer 10u 's ochtends en vervolgens weer afbouwt tot ongeveer 1u 's nachts. Tijdens de nacht, rond 4u, is een minimum te zien, aangezien er op dat moment nog weinig kilometers zijn afgelegd door personen met een BEV. Gemiddeld over de dag en voor de hele gemeente Rotterdam geldt er in dit scenario een laadbehoefte van 542 kWh per uur. De totale laadbehoefte van 80% van alle personen met een elektrisch voertuig die thuisladen bedraagt 13.018 kWh per dag, wat ongeveer neerkomt op 4,7 miljoen kWh per jaar.

Grafiek 11 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2025-80%

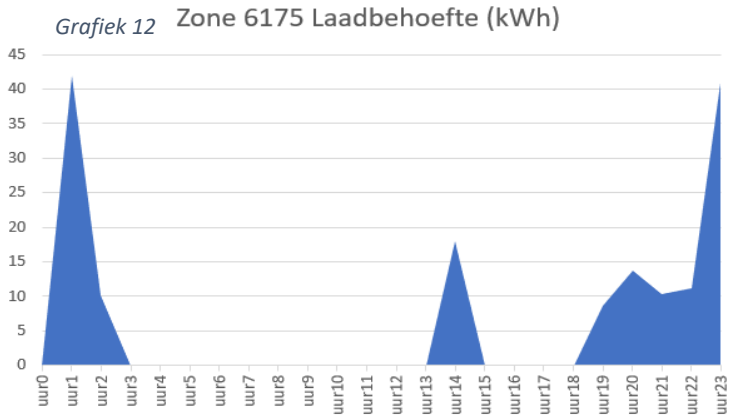


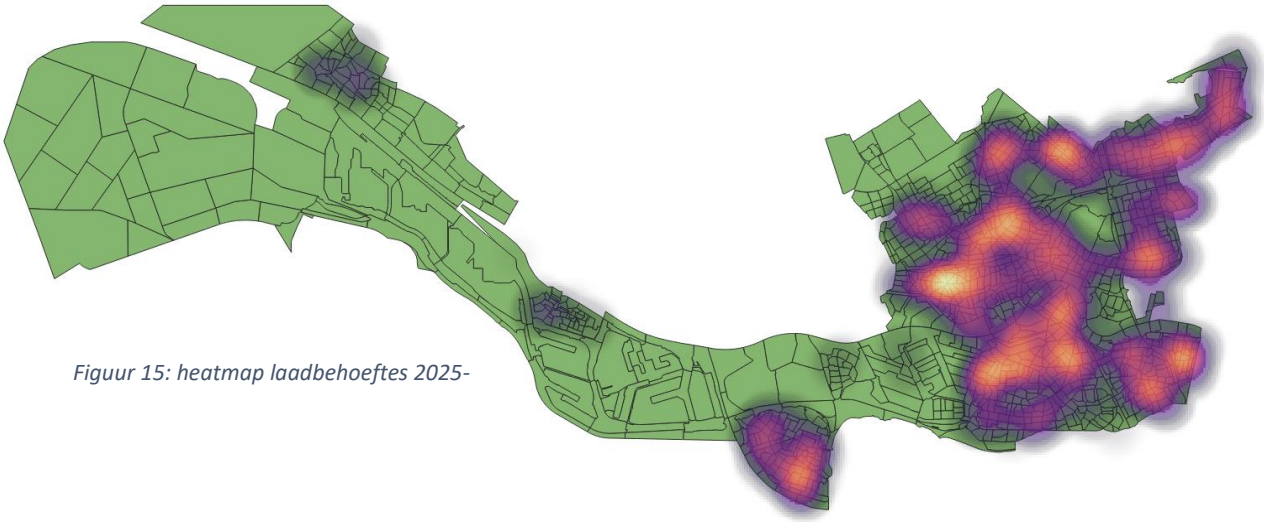
Als voor dit scenario wordt ingezoomd naar de laadbehoefte op zoneniveau, dan zijn er grote verschillen te zien tussen zones met flink variërende curves over de dag. Gemiddeld per zone bedraagt de laadbehoefte 9,4 kWh per dag. Doordat dit echter gaat om het minst ver gevorderde adoptiescenario met het minste aantal elektrisch voertuigen, zijn er nog veel zones die geen laadbehoeftes ervaren, en waarin ook aan geen enkel persoon een elektrisch voertuig is toegewezen. Dit gaat in dit scenario om 870 van de in totaal 1.383 zones in de gemeente Rotterdam. De maximale laadbehoefte per zone per dag bedraagt 154 kWh en behoort toe aan een zone in het centrum in de wijk Katendrecht in Rotterdam, met zonenummer 6175. Deze zone heeft relatief veel inwoners, woningen en horecagelegenheden en staat bij de eerste twee in de top 30 van alle zones in de gemeente Rotterdam. Deze zone heeft echter niet de meeste elektrische voertuigen toegewezen gekregen. Blijkbaar leggen de personen die in deze zone wonen zodoende relatief veel kilometers af met hun elektrische voertuig. In grafiek 12 is te zien dat de laadbehoefte over de dag geen nette curve volgt zoals in grafiek 11, maar een grilliger verloop heeft met pieken laat in de avond en in de nacht. Om de locaties en grootte van de laadbehoeftes op een duidelijke manier te visualiseren is een heatmap gemaakt, zie figuur 15. Hierin is te zien dat de laadbehoeftes zich voornamelijk concentreren in het centrum van Rotterdam, zowel boven als onder de Nieuwe Maas. Een andere hoge concentratie van laadbehoeftes bevindt zich in Hoogvliet, wat deel uitmaakt van Rotterdam en onderaan in het midden van de heatmap te zien is.



Figuur 14: zone hoogste laadbehoefte in scenario 2025-80% en 60%

Grafiek 12



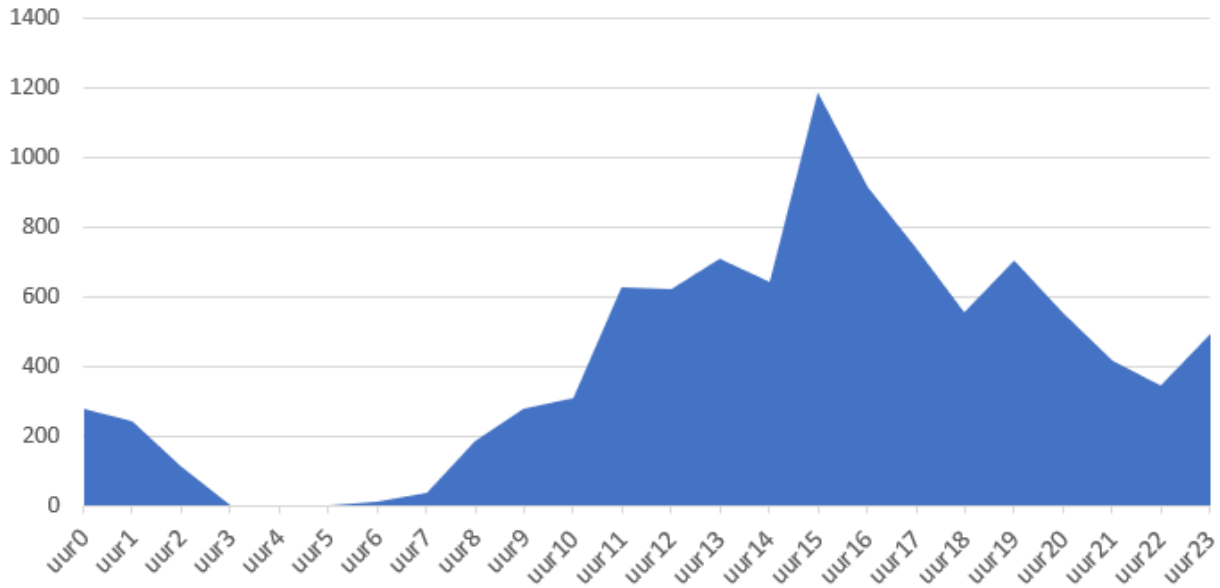


Figuur 15: heatmap laadbehoeftes 2025-

4.1.2 Locatiescenario 60% thuisladers

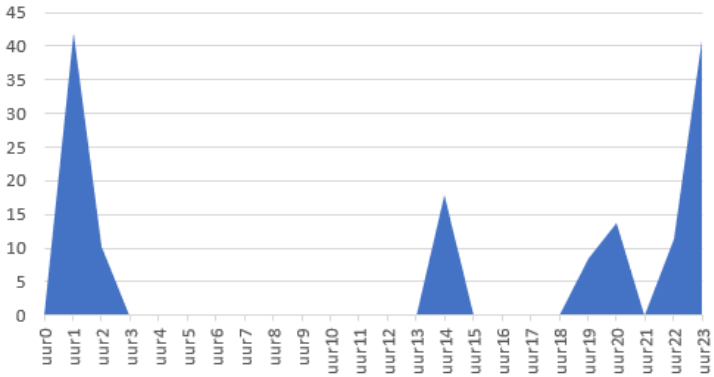
Als tweede wordt het eerste alternatieve locatiescenario besproken binnen het adoptiescenario van 2025, waarbij de thuisladers 60% bedraagt en waarbij de verwijderde groep werkladers 40% bedraagt. Grafiek 13 laat de laadbehoefte over de dag voor de thuisladers zien, in totaal voor de gemeente Rotterdam. Er is te zien dat er zich weer een piek bevindt tussen 15u en 16u 's middags, echter is deze minder hoog dan in het vorige scenario van 80% thuisladers en is met 1.187 kWh per uur 420 kWh lager dan bij het vorige scenario. De laadbehoefte over de dag laat ongeveer hetzelfde verloop zien, waar de piek opbouwt vanaf 10u 's ochtends en afbouwt tot ongeveer 23u 's avonds, en met een minimum in de nacht omdat er op moment nog weinig kilometers zijn afgelegd door elektrische voertuigen in FEATHERS. Over de dag geldt in dit scenario voor de hele gemeente een laadbehoefte van gemiddeld 416 kWh per uur, wat ongeveer 120 kWh per uur minder is dan het vorige scenario met 80% werkladers in plaats van 60%. De totale laadbehoefte van deze 60% thuisladers bedraagt 9.986 kWh per dag, wat ongeveer 3.000 kWh minder is dan bij het vorige scenario. Jaarlijks komt dit neer op ongeveer 3,6 miljoen kWh.

Grafiek 13 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2025-60%

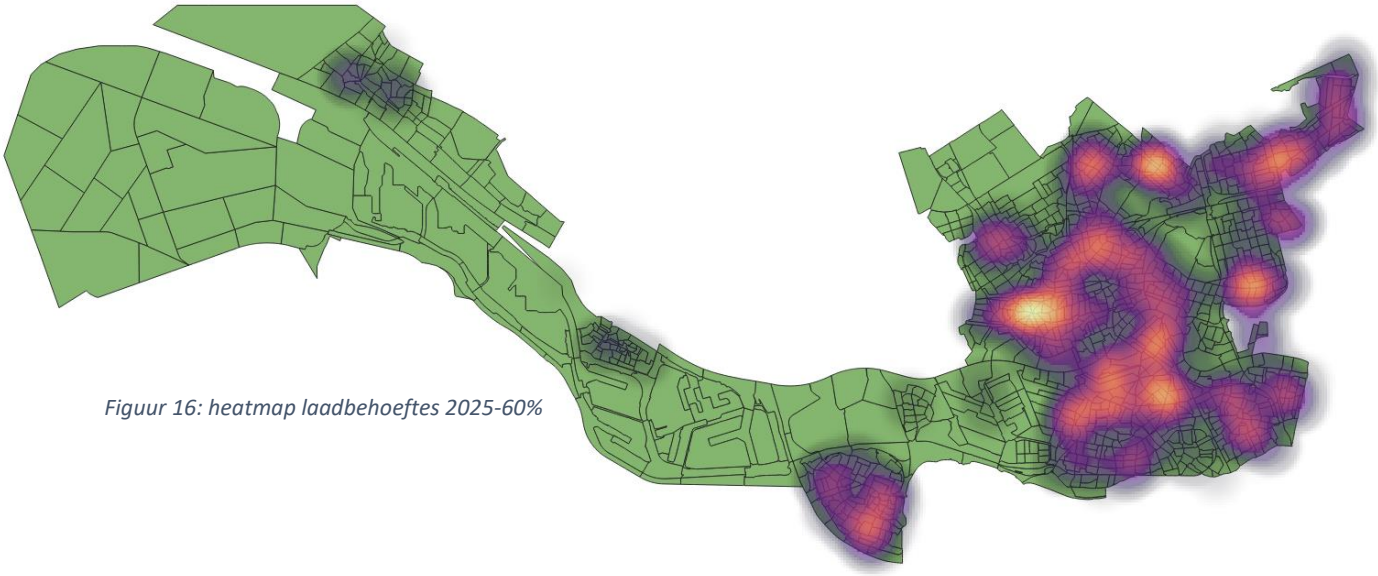


Ingezoomd naar zoneniveau bestaan er grote verschillen tussen zones onderling en variëren de laadbehoeftes over de dag behoorlijk per zone. Gemiddeld gezien bedraagt de laadbehoefte 7,2 kWh per zone per dag, wat ongeveer 2 kWh minder is dan het scenario met 80% thuisladers. Doordat in dit scenario willekeurig 20% meer werkladers zijn verwijderd uit de data, zijn er ook meer zones die geen laadbehoefte ervaren omdat er geen elektrische voertuigen zijn toegewezen aan thuisladende personen in deze zones. Er zijn in dit scenario 928 zones zonder laadbehoefte, wat er 58 meer zijn dan in het vorige scenario. De zone met de hoogste laadbehoefte is nog steeds de zone met nummer 6175 met een hoog aantal inwoners, woningen en

Grafiek 14 Zone 6175 Laadbehoefte (kWh)



horeca, alsook personen die relatief veel kilometers afleggen. Deze zone ervaart in totaal een laadbehoefte van 144 kWh per dag, wat 10 kWh minder is dan in het vorige scenario met 80% thuisladers. In grafiek 14 is het verloop van de laadbehoefte over de dag van deze zone te zien, welke maar enkele pieken laat zien op bepaalde momenten van de dag. Het voornaamste verschil met het vorige scenario is dat de laadbehoefte om 21u weg is gevallen. In figuur 16 is de heatmap te zien met de verdeling van de laadbehoeftes over de stad Rotterdam van het scenario 2025 met 60% thuisladers. Er is te zien dat de laadbehoefte zich overal wat minder sterk concentreert door de gedaalde energievraag in dit scenario. Het gebied van Hoogvliet laat nog steeds een duidelijke concentratie zien, alsook in het gebied ten zuiden van de Nieuwe Maas blijft een grote hotspot zichtbaar. De hotspots in het gebied ten noorden van de Nieuwe Maas zijn wat meer losgekoppeld dan in het vorige scenario, wat aanduidt dat hier enkele zones geen laadbehoefte meer ervaren of dat de laadbehoefte in dit gebied gedaald is.

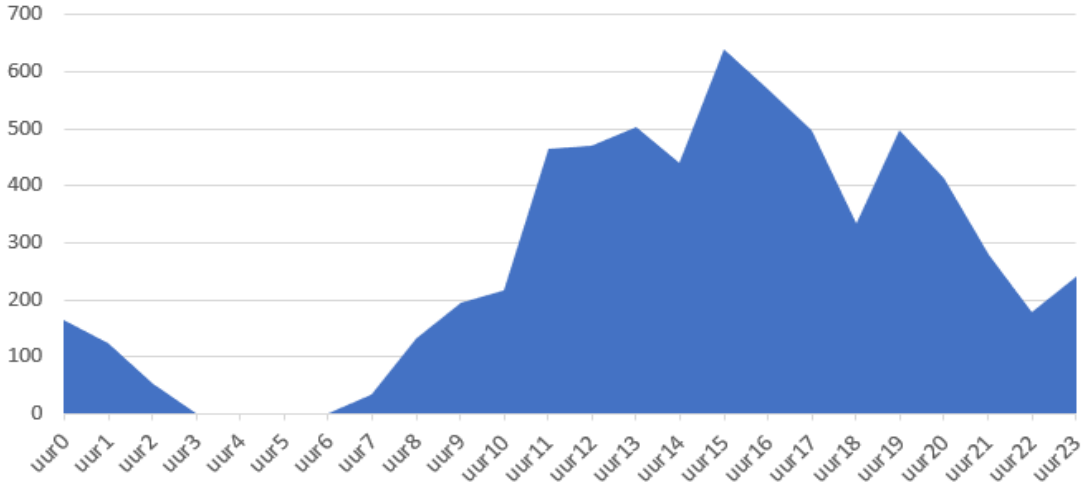


Figuur 16: heatmap laadbehoeftes 2025-60%

4.1.3 Locatiescenario 40% thuisladers

Als derde wordt het tweede alternatieve locatiescenario besproken binnen het adoptiescenario van 2025, waarbij de groep thuisladers 40% en de groep werkladers 60% bedraagt. Zodoende is het grootste deel van de laadbehoeftes is in dit scenario verwijderd uit de data, waarvan wordt aangenomen dat deze

Grafiek 15 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2025-40%

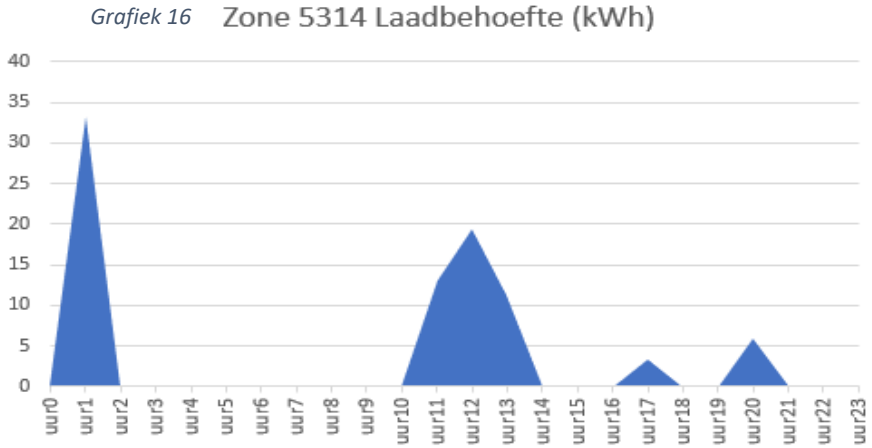


personen alleen bij het werk opladen. Grafiek 15 laat voor dit scenario de laadbehoefte zien over de dag voor alle thuisladers, in totaal voor de gemeente Rotterdam. Er is te zien dat het verloop over de dag ruwweg dezelfde curve volgt in vergelijking met de vorige twee scenario's, echter zijn de pieken minder hoog, wat duidt op een lagere laadbehoefte. Het maximum bevindt zich weer tussen 15u en 16u 's middags en bedraagt in dit scenario 640 kWh per uur en is daarmee relatief ietwat meer gedaald dan tussen de scenario's van 80% en 60% thuisladers. De daling van dit maximum ten opzichte van het vorige scenario met 60% thuisladers bedraagt ongeveer 550 kWh per uur. Het minimum bevindt zich weer in de nacht tussen 3u en 6u 's nachts, waarna de laadbehoefte zich opbouwt en daarna vanaf 15u weer afbouwt. Over de gehele dag en over alle zones geldt in dit scenario een gemiddelde laadbehoefte van 268 kWh per uur. Dit bedraagt een daling van bijna 150 kWh en daarmee is ook deze daling relatief ietwat groter dan de daling tussen de scenario's met 80% en 60% thuisladers. De totale laadbehoefte van één dag van de 40% thuisladers in dit scenario bedraagt 6.443 kWh, wat neerkomt op ongeveer 2,35 miljoen kWh per jaar. Dit is ongeveer 3.500 kWh minder dan bij het vorige scenario met 60% thuisladers. Ook dit aspect is de daling relatief groter dan de daling tussen de vorige scenario's van 80% en 60% thuisladers.

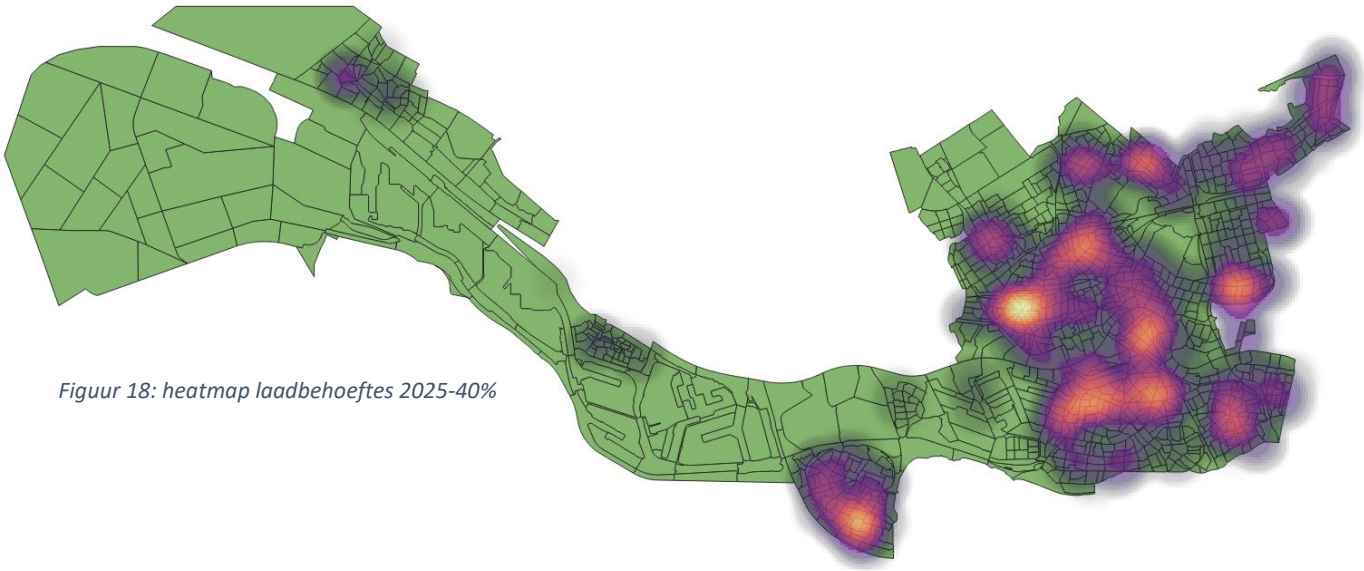
Als wordt gekeken op zoneniveau, dan is te zien dat er wederom veel verschil bestaat tussen zones onderling en tussen het verloop van de laadbehoefte over de dag. Gemiddeld gezien bedraagt de laadbehoefte in dit scenario met 40% thuisladers per zone 4,7 kWh per zone per dag, wat weer ongeveer 2 kWh minder is dan in het vorige scenario met 60% thuisladers. Ook is het aantal zones dat geen laadbehoeftes ervaren gestegen doordat er weer 20% meer werkladers zijn verwijderd uit de data in vergelijking met het vorige scenario. Het aantal zones dat geen laadbehoefte ervaart bedraagt in het scenario met 40% werkladers 1.027. Dit is een stijging van ongeveer 100 zones in vergelijking met het vorige scenario en ook is deze stijging ongeveer twee keer zo groot als de stijging tussen de scenario's met 80% en 60% thuisladers. De maximale laadbehoefte over één dag die een zone ervaart is in dit scenario 86,3 kWh en dit hoort bij een andere zone dan in de vorige twee scenario's, namelijk bij zone met nummer 5314, zie figuur 17. Deze zone ligt in het centrum van Rotterdam net ten noorden van de Nieuwe Maas en bevat relatief veel woningen. Deze zone heeft echter niet de meeste elektrische voertuigen toegewezen gekregen, wat erop duidt dat de personen in deze zone relatief veel kilometers afleggen.

Figuur 17: zone hoogste laadbehoefte scenario 2025-

Grafiek 16



In grafiek 16 is het verloop van de laadbehoefte in deze zone over de dag te zien. Ook deze zone vertoont hierin geen nette curve, maar laat een grillig verloop zien met de hoogste piek vroeg op de dag om 1u ’s nachts, met daarna nog een bredere piek tussen 10u en 14u en vervolgens nog twee kleinere pieken tegen het einde van de dag. In figuur 18 is de heatmap te zien voor het scenario 2025 met 40% thuisladers, waarin visueel duidelijk is weergegeven hoe de laadbehoeftes zich verspreiden over de gemeente Rotterdam en waar de hoogste behoeftes voor laadpalen voorkomen. In de heatmap is te zien dat de laadbehoeftes zich nog steeds voornamelijk concentreren in enkele gebieden in het centrum van Rotterdam. Echter blijft ook het gebied van Hoogvliet een behoorlijke concentratie van laadbehoeftes weergeven. Verder is te zien dat er in vergelijking met de vorige scenario’s steeds meer losse hotspots van laadbehoeftes zijn ontstaan doordat laadbehoeftes per zone zijn verminderd en ook doordat er meer zones zijn zonder laadbehoeftes. Voornamelijk de hotspots in de gebieden direct ten noorden en ten zuiden van de Nieuwe Maas zijn niet meer aan elkaar gekoppeld, wat inhoudt dat de laadbehoeftes zich meer op afzonderlijke plaatsen concentreren in dit scenario.



Figuur 18: heatmap laadbehoeftes 2025-40%

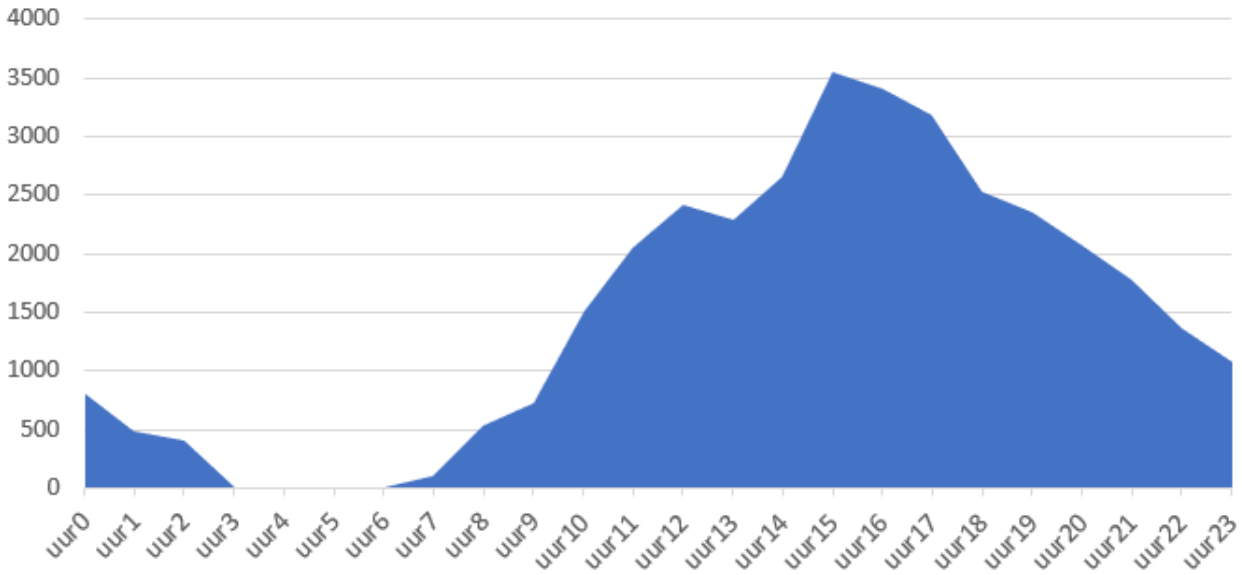
4.2 Adoptiescenario 2030

Het adoptiescenario voor 2030 is het middelste scenario doordat het tien jaar in de toekomst ligt en doordat het aantal toegewezen elektrische voertuigen tussen de andere twee adoptiescenario's in ligt. In dit scenario wordt uitgegaan van 86.063 elektrische voertuigen die willekeurig zijn toegewezen aan geselecteerde personen in Rotterdam. Ook hier bestaat een deel uit thuisladers en een deel uit werkladers, die willekeurig verwijderd zijn uit de data en daardoor geen publieke laadbehoefte ervaren. Hoeveel personen deze groep werkladers bevat is beschreven in de locatiescenario's. Allereerst wordt uitgegaan van 20% werkladers, waarna de twee alternatieve locatiescenario's uitgaan van respectievelijk 40% en 60% werkladers.

4.2.1 Locatiescenario 80% thuisladers

Als eerst wordt het scenario voor 2030 besproken waarbij de thuisladers 80% bedragen en de verwijderde werkladers groep 20%. Grafiek 17 laat de laadbehoefte over de dag zien voor de gemeente Rotterdam in dit scenario. Te zien is dat de piek weer ligt rond 15u 's middags en dat deze 3.514 kWh bedraagt, wat meer dan twee keer zoveel is als het vergelijkbare scenario van vijf jaar eerder. Ook is te zien dat de laadbehoefte vanaf 6u 's ochtends begint toe te nemen, waarna om 15u het maximum wordt bereikt en vervolgens weer daalt tot laat in de avond en het minimum bereikt midden in de nacht tussen 3u en 6u. Over de hele dag en voor de hele gemeente bedraagt de laadbehoefte gemiddeld 1.470 kWh per uur, wat bijna drie keer zo groot is als het vergelijkbare scenario van vijf jaar eerder. De totale laadbehoefte over de hele dag voor alle zones bedraagt 35.277 kWh, wat ongeveer 22.000 kWh meer is dan vijf jaar eerder. Jaarlijks komt dit voor 2030 met 80% thuisladers neer op een totaal van ongeveer 12,9 miljoen kWh.

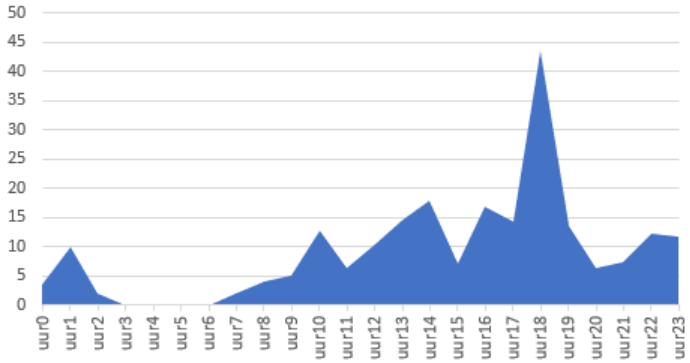
Grafiek 17 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2030-80%

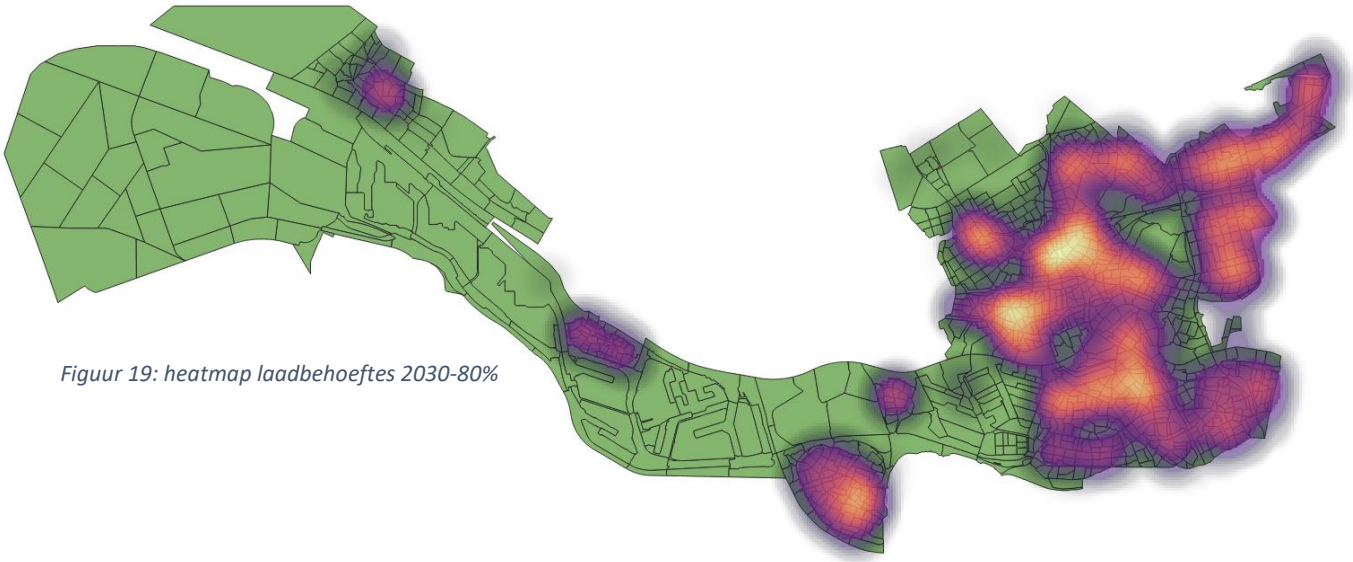


Ingezoomd naar zoneniveau zijn ook de laadbehoeftes per zone behoorlijk toegenomen, waarbij iedere zone een zeer verschillend verloop over de dag laat zien. De laadbehoefte per zone bedraagt gemiddeld 25,5 kWh over de dag, wat ongeveer 16 kWh meer is dan het scenario van 2025. Aangezien er in dit scenario meer dan twee keer zoveel elektrische voertuigen zijn toegewezen, neemt ook het aantal zones zonder laadbehoefte af. Voor dit scenario zijn dit er 545, wat er meer dan 200 minder zijn dan vijf jaar eerder. De zone die in dit scenario de hoogste laadbehoefte ervaart is weer zone 6175, met 221,5 kWh in

totaal over de dag. Deze zone in het centrum van de stad blijft een hoge laadbehoefte ervaren doordat er zich relatief veel woningen, inwoners en horecagelegenheden bevinden en doordat de bewoners in deze zone blijkbaar veel kilometers afleggen met hun elektrische voertuig. Door het toegenomen aantal elektrische voertuigen in dit scenario, is het verloop van de laadbehoefte over de dag voor deze zone een nettere curve als vijf jaar eerder, met een piek om 18u waar doorheen de dag naartoe wordt opgebouwd, zie grafiek 18. Ook is een heatmap opgesteld voor dit scenario van 2030 met 80% thuisladers, zie figuur 19. Hierin is te zien dat de hotspots dichter geconcentreerd zijn en meer aan elkaar zijn aangesloten dan het vergelijkbare scenario van vijf jaar eerder. Het centrum, zowel boven als onder de Nieuwe Maas, blijft een hoge concentratie van laadbehoeftes ervaren. Echter is in dit scenario ook in de omringende gebieden een hogere laadbehoefte te zien, zowel in Hoogvliet, Maassluis en Hoek van Holland.

Grafiek 18 Zone 6175 Laadbehoefte (kWh)





Figuur 19: heatmap laadbehoeftes 2030-80%

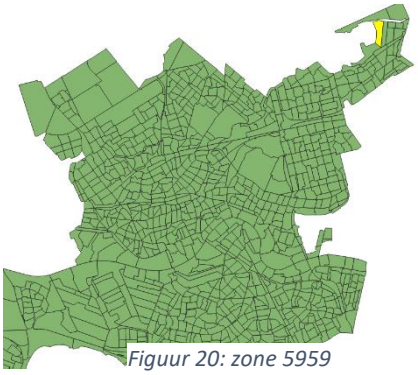
4.2.2 Locatiescenario 60% thuisladers

Als tweede wordt het scenario besproken met 60% thuisladers en waar de overige 40% werkladers verwijderd zijn uit de data. In dit scenario is de groep van verwijderde werkladers toegenomen met 20 procentpunten en zijn er dus meer personen die bij werk laden en daardoor geen publieke laadbehoefte ervaren. Grafiek 19 laat het verloop van de laadbehoefte over de dag zien voor de gehele gemeente Rotterdam. Er is te zien dat het maximum wederom rond 15u ’s middags ligt. Deze piek omvat een laadbehoefte van 2.609 kWh per uur, wat ongeveer 900 kWh minder is dan in het scenario van 2030 met 80% thuisladers. Het verloop van deze laadbehoefte over de dag ziet er, net als in het vorige scenario, redelijk net uit, met een opbouw van laadbehoefte die begint in de ochtend, waarna de piek in het begin van de avond begint af te nemen. Midden in de nacht is wederom een minimum te zien, waar er geen laadbehoefte is. Voor de gemeente Rotterdam bedraagt de laadbehoefte over de dag in dit scenario gemiddeld 1.105 kWh per uur. Dit is ongeveer 360 kWh minder dan in het scenario met 80% thuisladers

en als deze daling vergeleken wordt met de daling tussen de vergelijkbare scenario's van 2025, dan is deze daling procentueel ietwat groter. In dit 2030 scenario geldt een daling van 25%, en in het 2025 scenario bedroeg deze daling bijna 23%. De totale laadbehoefte over de hele dag voor alle zones bedraagt in dit scenario van 2030 met 60% thuislades 26.515 kWh, wat ongeveer 8.700 kWh minder is dan bij het scenario met 80% thuisladers. Ook hier is de daling ietwat groter dan die tussen de vergelijkbare scenario's van 2025. Waar de daling in 2030 25% inhoudt, was die in 2025 bijna 24%. In totaal komt dit voor het huidige 2030 scenario met 60% thuisladers neer op een jaarlijkse laadbehoefte van 9,7 miljoen kWh.

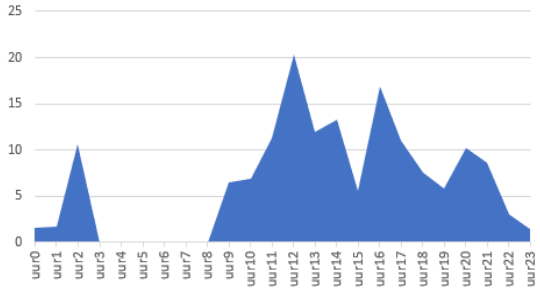
Grafiek 19 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2030-60%

Als gekeken wordt naar zoneniveau, dan blijkt dat de gemiddelde laadbehoefte per zone 19,2 kWh per dag bedraagt, wat ongeveer 6 kWh minder is dan bij het scenario met 80% thuisladers. Vergeleken met de corresponderende scenario's van 2025 bedraagt deze daling in dat scenario 23%, en in dit scenario van 2030 bedraagt deze daling 25%, wat laat zien dat ook deze daling in het huidige scenario van 2030 ietwat groter is dan in 2025. Het aantal zones dat geen laadbehoefte ervaart voor het scenario van 2030 met 60% thuisladers is toegenomen met 15 naar 560, wat een relatief lage stijging is vergeleken met de vergelijkbare scenario's van vijf jaar eerder, waar de stijging meer dan drie keer zo groot was. De zone met de hoogste laadbehoefte over een dag in dit scenario van 2030 bedraagt 154,4 kWh. Dit gaat om de zone met nummer 5959, welke in de noordoostelijke punt van de gemeente Rotterdam ligt, zie figuur 20. Dit is een woonwijk in de wijk Nesselande in Rotterdam. In tegenstelling tot de eerdere zones met de hoogste laadbehoefte, ligt deze zone niet in het centrum van de stad en bevat deze zone ook geen buitengewoon aantal inwoners of woningen. Wat deze zone wel uniek maakt, is dat deze zone, in tegenstelling tot de vorige zones met de hoogste laadbehoefte, het hoogste aantal elektrische voertuigen toegewezen heeft gekregen in dit scenario, wat ervoor zorgt dat ook de totale laadbehoefte hier hoog is. Ook de curve van de laadbehoefte in deze zone laat een redelijk net verloop zien, met een piek om 12u 's middags en een daling naar de late avond toe, zie grafiek 20.

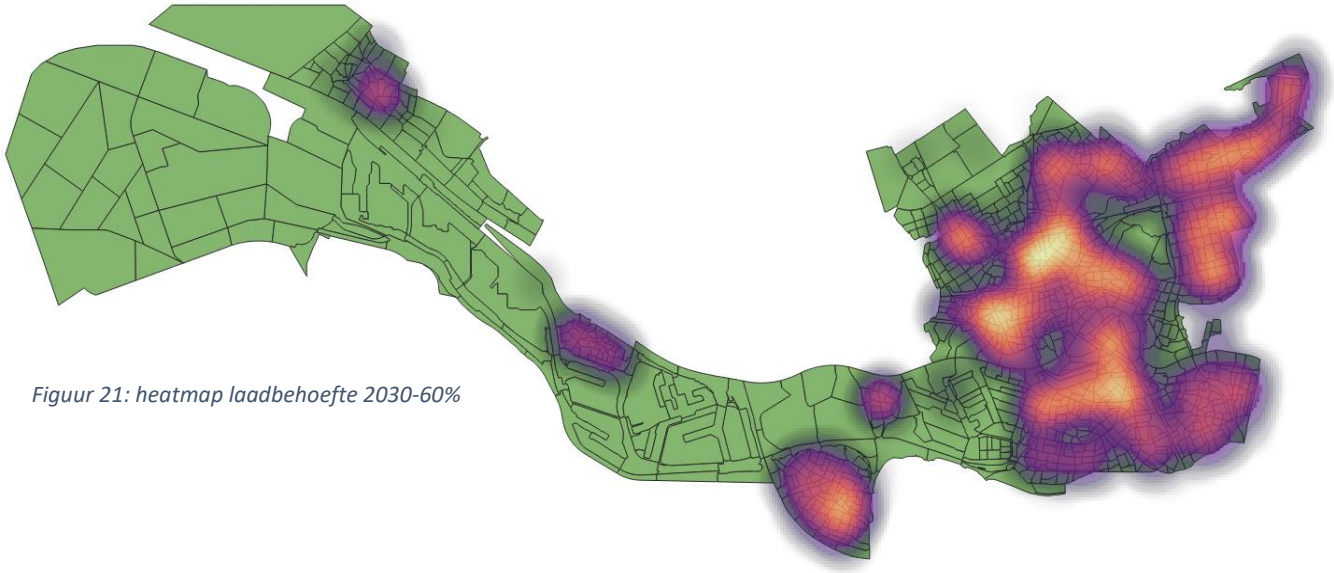


Figuur 20: zone 5959

Grafiek 20 Zone 5959 Laadbehoefte (kWh)



De opgestelde heatmap voor dit scenario van 2030 met 60% thuisladers laat geen grote verschillen zien met de heatmap voor 80% thuisladers, zie figuur 21. De laadbehoeftes concentreren zich voornamelijk nog in het centrum, boven en onder de Nieuwe Maas. Verder zijn in enkele gebieden omringend aan het centrumgebied de concentraties van de hotspots ietwat afgenomen.

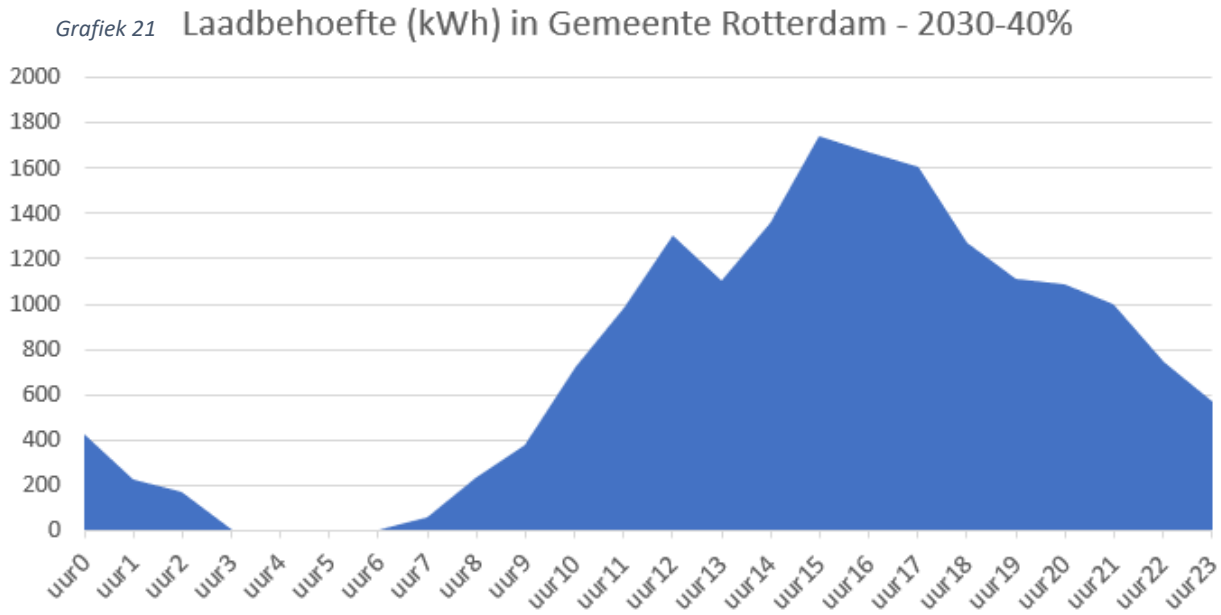


Figuur 21: heatmap laadbehoefte 2030-60%

4.2.3 Locatiescenario 40% thuisladers

Als derde wordt het scenario besproken met 40% thuisladers, en waar dus de werkladers het overgrote deel van de laadbehoefte bevatten en verwijderd zijn uit de dataset met thuisladers. Grafiek 21 laat het verloop zien van de laadbehoefte over de dag voor de gemeente Rotterdam. Wederom is er een maximum te zien rond 15u 's middags van 1.744 kWh, wat weer ongeveer 900 kWh minder is dan bij het vorige scenario met 60% thuisladers. Ook ziet het verloop van de laadbehoefte over de dag er nagenoeg hetzelfde uit met een minimum in het midden van de nacht en een laadbehoefte die rond 7u begint op te lopen. De laadbehoefte in dit scenario bedraagt over de dag voor de hele gemeente Rotterdam gemiddeld

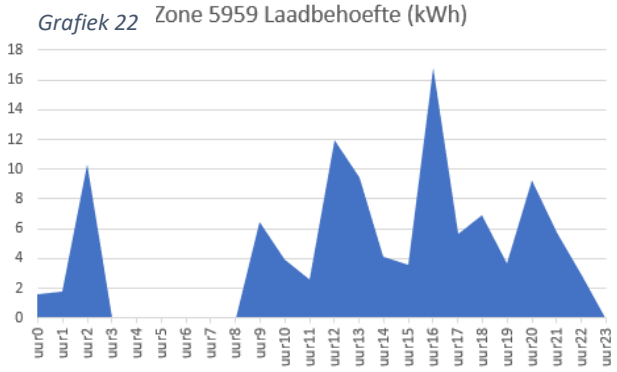
Grafiek 21

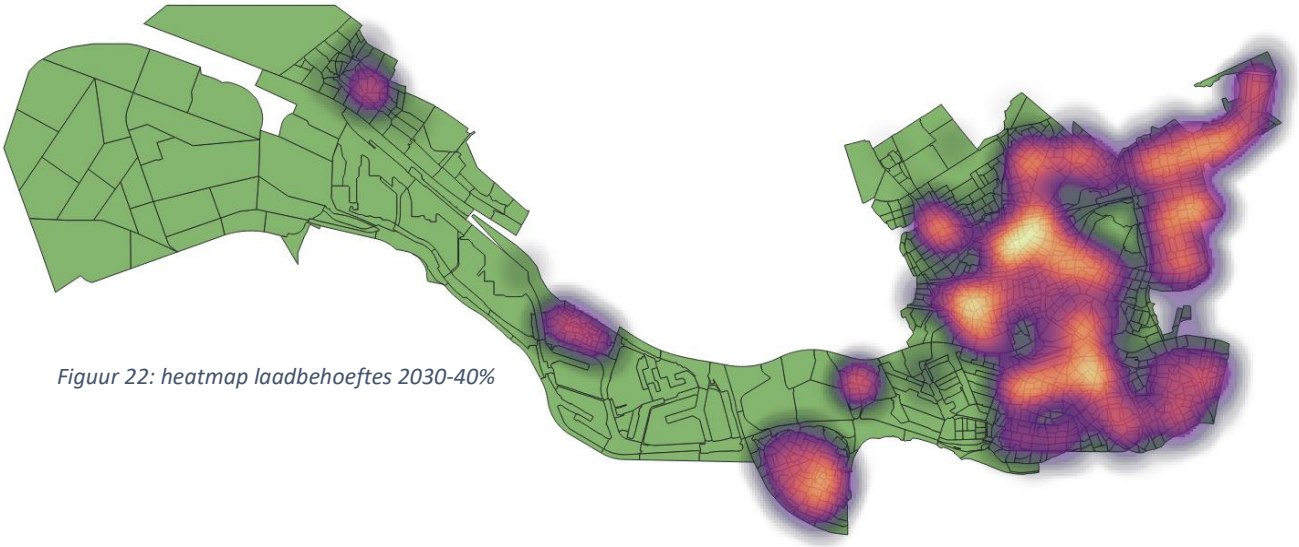


742 kWh per uur, wat een daling betekent van ongeveer 360 kWh ten opzichte van het vorige scenario met 60% thuisladers. Deze daling is nagenoeg gelijk gebleven in vergelijking met de daling tussen de scenario's met 80% thuisladers en 60% thuisladers. Als deze daling van 33% vergeleken wordt met de corresponderende daling van binnen het scenario van 2025, welke 36% bedroeg, dan blijkt dat de daling in 2025 juist wat groter is. De totale laadbehoefte over de hele dag voor alle zones bedraagt in dit scenario van 2030 met 40% thuisladers 17.796 kWh, wat ongeveer 8.700 kWh minder is dan bij het scenario met 60% thuisladers en nagenoeg gelijk is aan de daling tussen de scenario's van 2030 met 80% en 60% thuisladers. Ook dit bedraagt een daling van 33%, terwijl deze daling tussen de vergelijkbare scenario's van 2025 36% bedraagt en daarmee relatief wat lager uitvalt. In totaal is de jaarlijkse laadbehoefte voor het 2030 scenario met 40% thuisladers 6,5 miljoen kWh.

Ingezoomd naar zoneniveau, blijkt dat de gemiddelde laadbehoefte per zone 12,9 kWh per dag bedraagt, wat een daling is van ongeveer 6 kWh vergeleken met het vorige scenario met 60% thuisladers en evenveel is als de daling tussen de scenario's met 80% en 60% thuisladers in 2030. Als gekeken wordt naar deze daling ten opzichte van de corresponderende locatiescenario's van 2025, dan blijkt dat ook hier binnen de scenario's van 2025 een ietwat grotere daling te zien is dan tussen dezelfde scenario's van 2030, namelijk een daling van 35% voor 2025 ten opzichte van 33% voor 2030. Het aantal zones dat geen laadbehoefte ervaart in het scenario van 2030 met 40% thuisladers is gestegen ten opzichte van het vorige locatiescenario met 32 naar 592, wat weer een relatief lage stijging is ten opzichte van vijf jaar eerder. Ook is in dit scenario van 2030 met 40% thuisladers weer de zone met nummer 5959 degene met de hoogste laadbehoefte in totaal over de dag, welke 106,6 kWh bedraagt. Er geldt weer dat deze zone de meeste elektrische voertuigen toegewezen heeft gekregen, wat zorgt voor de hoogste laadbehoefte. Kijkende naar het verloop van de laadbehoefte in deze zone over de dag, dan valt op dat deze grilliger is dan bij het scenario met 60% thuisladers, met meerdere pieken en dalen doorheen de dag, zie grafiek 22.

Grafiek 22





Figuur 22: heatmap laadbehoeftes 2030-40%

In figuur 22 is de opgestelde heatmap te zien voor dit scenario van 2030 met 40% thuisladers. Veel grote verschillen ten opzichte van de vorige twee locatiescenario's zijn niet te zien, er zijn nog steeds hotspots te vinden van concentraties van laadbehoeftes in de gebieden buiten het centrum zoals Hoogvliet, Maassluis en Hoek van Holland. Echter hebben de hotspots in het centrum een ietwat mindere omvang gekregen en daardoor zijn wat meer tussenliggende gebieden ontstaan, wat komt door het weggevallen deel werkladers.

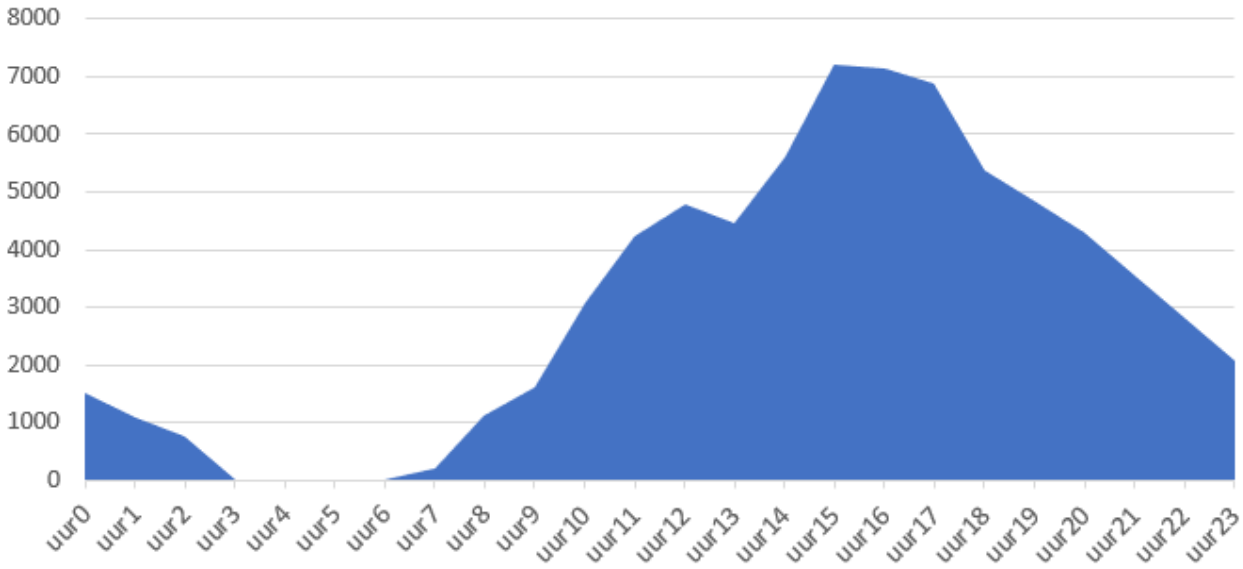
4.3 Adoptiescenario 2035

Het adoptiescenario voor 2035 wordt gekenmerkt doordat dit scenario het verst in de toekomst ligt en zodoende ook het hoogste aantal elektrische voertuigen toegewezen heeft gekregen in vergelijking met de vorige twee adoptiescenario's. In dit scenario wordt uitgegaan van 149.667 elektrische voertuigen, die willekeurig zijn toegewezen aan geselecteerde personen in Rotterdam. Net als bij de vorige adoptiescenario's is in dit scenario ook telkens een deel werkladers verwijderd uit de data, waarvan wordt aangenomen dat deze bij het werk laden en geen publieke laadbehoefte ervaren. Wederom bevatten deze locatiescenario's achtereenvolgens 80%, 60% en 40% thuisladers, waardoor respectievelijk 20%, 40% en 60% zijn aangenomen als werkladers en zijn verwijderd.

4.3.1 Locatiescenario 80% thuisladers

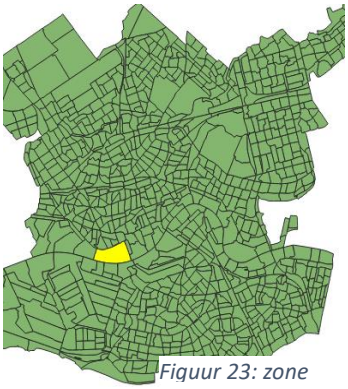
Als eerste wordt het scenario voor 2035 besproken met 80% thuisladers en waar de verwijderde groep werkladers 20% bedraagt. Grafiek 23 laat het verloop van de laadbehoefte over de dag zien voor dit scenario. Het maximum ligt weer rond 15u 's middags, waar vanaf 6u 's ochtends naartoe wordt opgebouwd met alleen rond 13 's middags even een daling in deze opbouw. Vervolgens daalt de laadbehoefte vanaf 17u bijna lineair richting het minimum midden in de nacht. Het maximum bedraagt in dit scenario 72.101 kWh, wat meer dan twee keer zoveel is als vijf jaar eerder en meer dan vier keer zo veel als tien jaar eerder. In dit scenario, over de dag en over alle zones in de gemeente, bedraagt de gemiddelde laadbehoefte 3.030 kWh per uur, wat meer dan twee keer zo veel is als in het vergelijkbare scenario van 2030 en bijna zes keer zo groot als in 2025. De totale laadbehoefte voor alle zones bedraagt in het huidige scenario van 2035 72.726 kWh, wat de hoogste behoefte is van alle scenario's doordat deze het verst in de toekomst ligt en hier de minste werkladers verwijderd zijn uit de data. Dit is ongeveer 37.000 kWh meer dan in 2030 en maar liefst 60.000 meer dan in 2025. Jaarlijks komt dit voor het huidige scenario van 2035 neer op 26,5 miljoen kWh.

Grafiek 23 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2035-80%



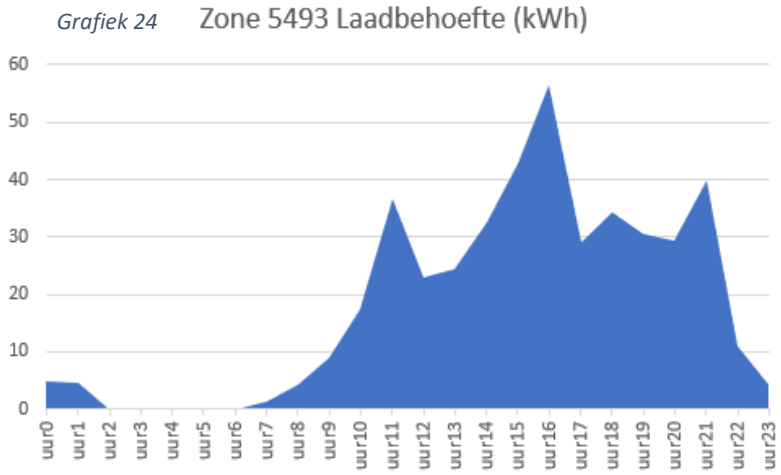
Als gekeken wordt op zoneniveau dan blijkt dat de laadbehoeftes per zone ook flink zijn toegenomen, waarbij individuele zones behoorlijk kunnen verschillen, maar dat er door het hoge aantal elektrische voertuigen in dit scenario redelijk nette laadbehoefte curves te zien zijn over de dag. De gemiddelde

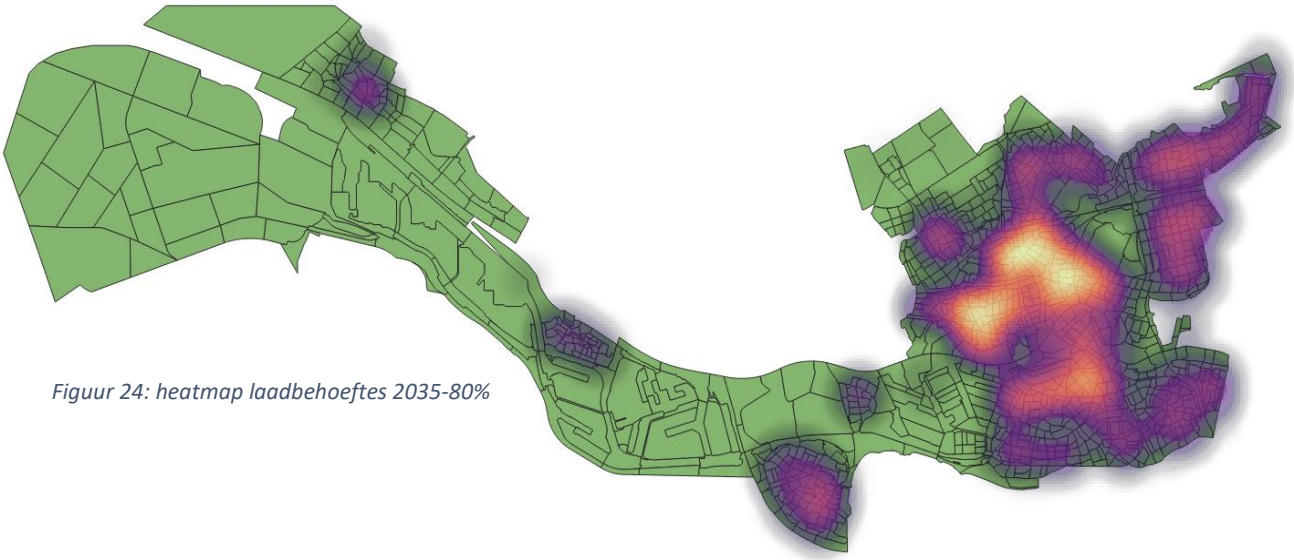
laadbehoefte per zone in totaal over de dag bedraagt 52,6 kWh, wat ietwat meer dan twee keer zo veel is als het scenario van vijf jaar eerder en bijna zes keer zo veel als tien jaar eerder. Door het grote aantal toegewezen elektrische voertuigen in dit scenario van 2035, bevat dit scenario ook het minste aantal zones zonder laadbehoefte, namelijk 483. De zone in dit scenario met de hoogste laadbehoefte is de zone met nummer 5493, deze ervaart een laadbehoefte van 436 kWh per dag. Deze zone ligt in de wijk Schiemond, ten westen van het centrum en net boven de Nieuwe Maas, zie figuur 23. Deze zone heeft relatief veel elektrische voertuigen toegewezen gekregen, er zijn maar twee zones die er meer zijn toebedeeld, waardoor de personen met een elektrisch voertuig in deze zone klaarblijkelijk relatief veel kilometers afleggen. Ook is het een zone met relatief veel woningen en inwoners; beiden zitten binnen de 36 zones met het hoogste inwoner- en woningaantal. En er zijn veel horecagelegenheden en arbeidsplaatsen te vinden, door de nabije ligging van een haven en de Nieuwe Maas. Doordat deze zone een van de zones is met het hoogste aantal elektrische voertuigen over alle scenario's, is het verloop van de laadbehoefte ook vergelijkbaar met het veel voorkomende verloop van de totale laadbehoefte van Rotterdam in de verschillende scenario's met een piek rond 16u 's middags en een minimum tijdens de nacht, zie grafiek 24.



Figuur 23: zone

Grafiek 24





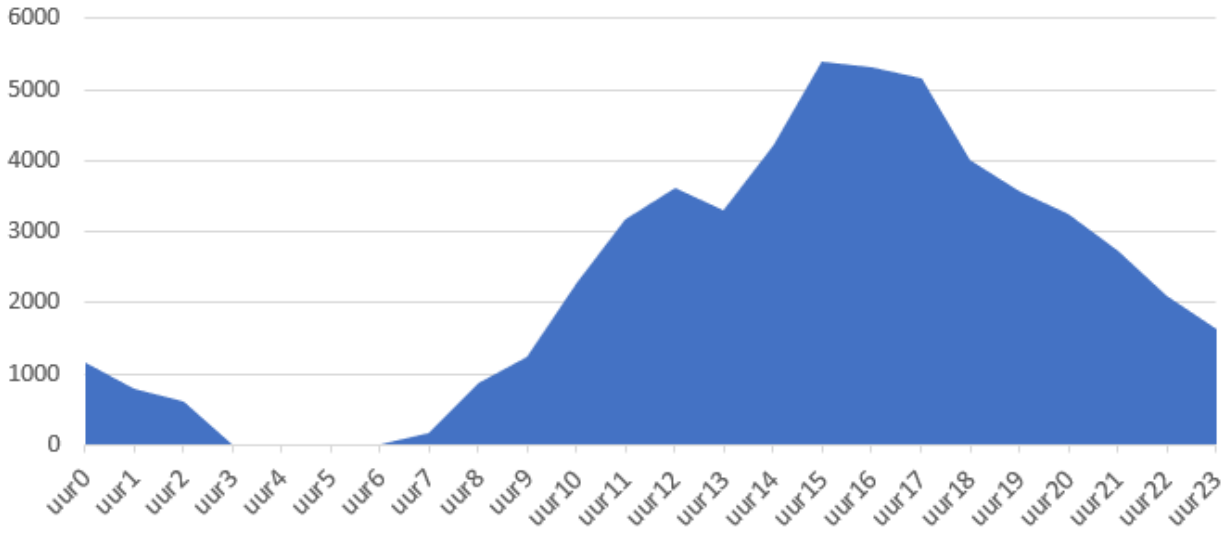
Figuur 24: heatmap laadbehoeftes 2035-80%

Wederom is er een heatmap opgesteld voor dit scenario van 2035 met 80% thuisladers om te zien waar de laadbehoeftes zich concentreren, zie figuur 24. Er is te zien dat de laadbehoefte zich meer concentreert in het centrumgebied in vergelijking met de vergelijkbare scenario's van vijf en tien jaar eerder. Voornamelijk in het gebied ten noorden van de Nieuwe Maas is een hoge concentratie van laadbehoeftes te zien en in de omringende gebieden van Hoogvliet, Maassluis en Hoek van Holland is de concentratie van laadbehoeftes afgenomen.

4.3.2 Locatiescenario 60% thuisladers

Als tweede wordt het eerste alternatieve locatiescenario besproken binnen het scenario voor 2035, waarbij de groep thuisladers 60% bedraagt en de verwijderde groep werkladers 40%. In grafiek 25 is te zien dat de totale laadbehoefte voor Rotterdam over de dag nog nagenoeg hetzelfde verloopt vertoont als in de vorige scenario's, met een maximum om 15u en een minimum tijdens de nacht. Dit maximum om 15u bedraagt in dit scenario 5.402 kWh per uur, wat 1.800 kWh minder is dan bij het vorige locatiescenario met 80% thuisladers. Over alle zones in de gemeente Rotterdam bedraagt de laadbehoefte gemiddeld 2.274 kWh per uur, wat ongeveer 800 kWh minder is dan in het scenario met 80% thuisladers. Als deze daling van 25% wordt vergeleken met dezelfde locatiescenario's van vijf en tien jaar eerder, dan blijkt dat de daling procentueel gelijk is binnen de 2030 scenario's en 2 procentpunt meer is dan tijdens de 2025 scenario's, waar een daling geldt van 23% voor de gemiddelde kWh per uur. De totale laadbehoefte over alle zones in de gemeente Rotterdam bedraagt voor het huidige 2035 scenario 54.586 kWh per dag, wat ongeveer 18.100 kWh minder is dan het scenario met 80% thuisladers. Vergeleken met dezelfde locatiescenario's van vijf en tien jaar eerder, blijkt dat de procentuele daling in 2035 van 25% ook geldt voor de corresponderende daling van de totale laadbehoefte per dag binnen het 2030 scenario. Dezelfde daling binnen het 2025 scenario bedraagt echter 23% en is daarmee weer ietwat minder groot dan tijdens de latere adoptiescenario's. In totaal bedraagt de laadbehoefte voor alle zones in 2035 met 60% thuisladers 39,5 miljoen kWh per jaar.

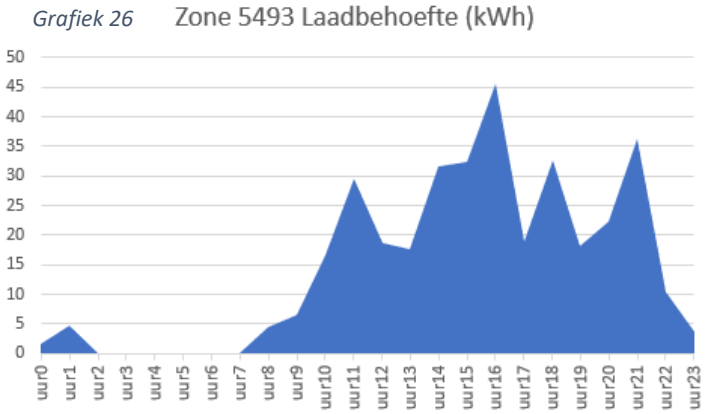
Grafiek 25 Laadbehoefte (kWh) in Gemeente Rotterdam - 2035-60%

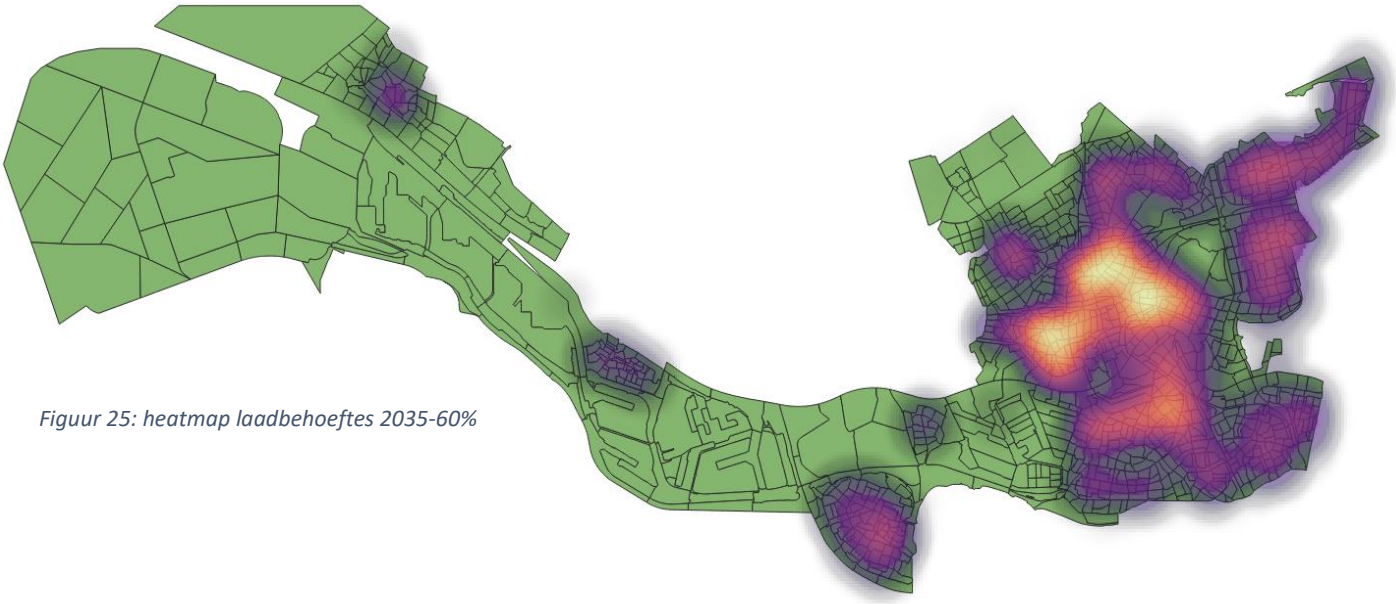


Als ingezoomd wordt naar zonenniveau, dan blijkt dat de gemiddelde laadbehoefte per zone per dag 39,5 kWh bedraagt, wat ongeveer 13 kWh en 25% minder is dan bij het vorige locatiescenario met 80% thuisladers. Vergeleken met de corresponderende locatiescenario's van 2025 en 2030 blijkt dat de

vergelijkbare daling in 2030 ook 25% bedroeg, echter bedroeg de daling in 2025 23% en is daarmee ietwat minder groot dan de daling in 2030 en 2035. Het aantal zones dat geen laadbehoefte ervaren is gestegen, ten opzichte van het vorige 2035 scenario met 80% thuisladers, met 19 naar 502 zones. Deze stijging is vergelijkbaar met het 2030 scenario, echter was de stijging in het 2025 scenario bijna drie keer groter. De zone in dit scenario van 2035 is wederom de zone met nummer 5493. Deze ervaart nu een laadbehoefte van in totaal 352 kWh, wat een daling is van ongeveer 80 kWh vergeleken met het vorige locatiescenario van 80% thuisladers. Deze zone in Schiemond is weer niet de zone met de meeste toegewezen elektrische voertuigen, echter leggen de bewoners in deze zone blijkbaar relatief veel kilometers af op een dag. Het verloop van de laadbehoefte in deze zone voor dit scenario met 60% thuisladers ziet er logischerwijs grilliger uit dan het scenario van vijf jaar eerder, doordat er minder elektrische voertuigen zijn toegewezen. Er zijn meerdere pieken en dalen te zien, met het maximum om 16u 's middags, zie grafiek 26. In figuur 25 is de heatmap te zien voor het scenario van 2035 met 60% thuisladers. Wederom is zichtbaar dat de laadbehoeftes zich voornamelijk concentreren in het centrum, en voornamelijk boven de Nieuwe Maas, en dat de omliggende gebieden van Hoogvliet, Maassluis en Hoek van Holland een lagere concentratie laten zien in vergelijking met de adoptiescenario's van vijf en tien jaar eerder. Ten opzichte van het vorige locatiescenario met 80% thuisladers zijn geen grote verschillen te zien, alleen dat de concentraties op enkele plaatsen in het centrum een wat minder grote laadbehoefte ervaren waardoor de hotspots ietwat minder groot zijn geworden

Grafiek 26



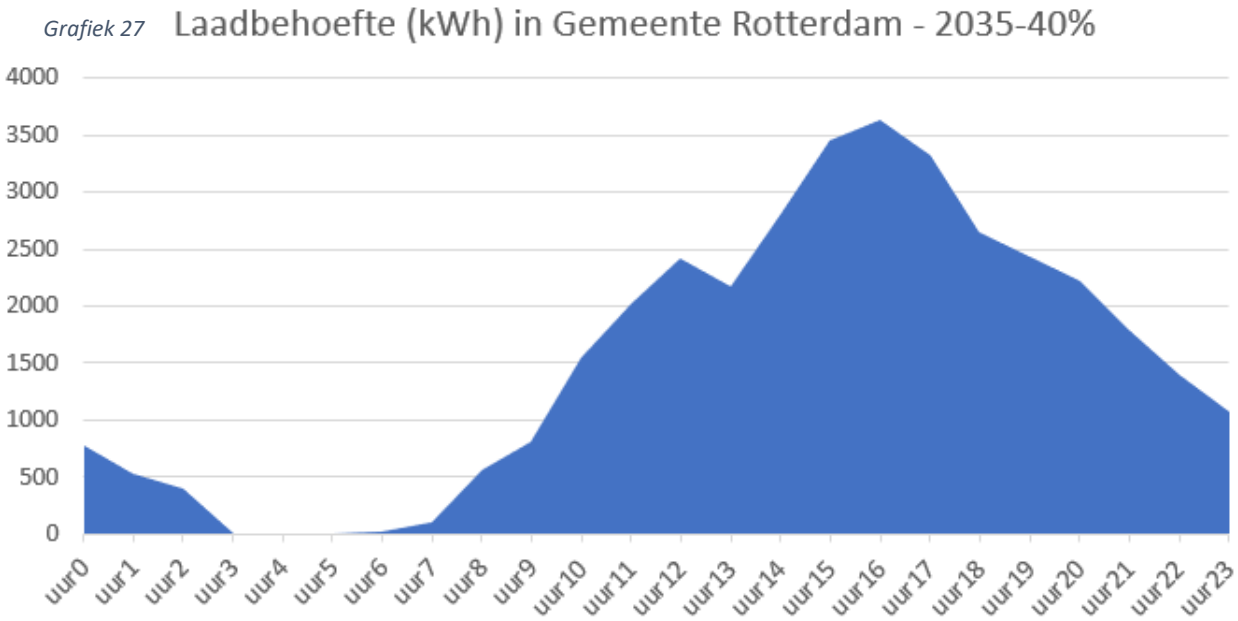


Figuur 25: heatmap laadbehoeftes 2035-60%

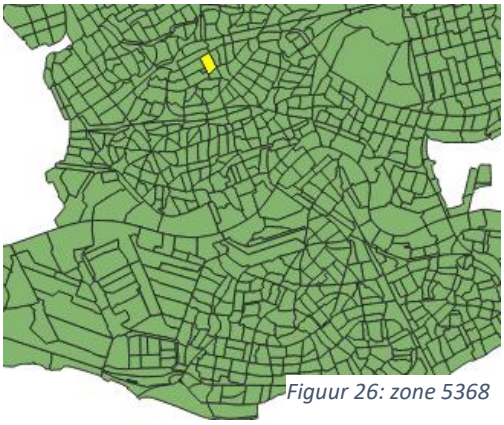
4.3.3 Locatiescenario 40% thuisladers

Als derde wordt het scenario voor 2035 besproken met 40% thuisladers en 60% werkladers, en waar dus de verwijderde groep werkladers in de meerderheid is. Grafiek 27 laat het verloop van de laadbehoefte over de dag zien wat nagenoeg hetzelfde blijft in vergelijking met eerdere grafieken. Echter is voor het eerst een maximum te zien op een ander tijdstip, namelijk om 16u 's middags. Dit maximum bedraagt 3.641 kWh per uur, wat weer ongeveer 1.800 kWh minder is dan bij het vorige locatiescenario van 2035. De gemiddelde laadbehoefte over alle zones bedraagt in dit scenario 1.508 kWh per uur, wat wederom ongeveer 800 kWh minder is dan bij het vorige locatiescenario van 2035 met 60% thuisladers. In dit scenario met 40% thuisladers bedraagt deze daling 34%, wat maar 1% meer is dan de vergelijkbare locatiescenario's van 2030 en 2% minder dan tussen de locatiescenario's van 2025. De totale laadbehoefte over de dag voor alle zones bedraagt in dit scenario voor 2035 met 40% thuisladers 36.203 kWh, wat ongeveer 18.400 kWh minder is dan bij het vorige scenario met 60% thuisladers en zodoende ietwat groter is dan de daling tussen de scenario's van 80% en 60% thuisladers in 2035. Ook hier bedraagt dit een daling van 34%, terwijl tussen de vergelijkbare locatiescenario's van 2030 een daling gold van 33% en tussen die van 2025 bedroeg deze daling 36%. In totaal zorgt dit voor het huidige scenario van 2035 voor een laadbehoefte in gemeente Rotterdam van 13,2 miljoen kWh per jaar.

Grafiek 27



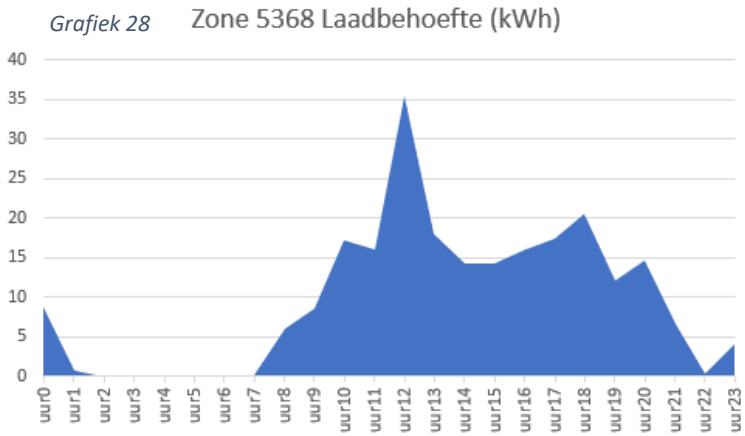
Als gekeken wordt naar zoneniveau, dan blijkt dat de gemiddelde laadbehoefte per zone in 2035 met 40% thuisladers 26,2 kWh per dag bedraagt, wat weer ongeveer 13 kWh minder is dan bij het vorige locatiescenario. Procentueel komt deze daling uit op 34% en als deze vergeleken wordt met de corresponderende dalingen van vijf en tien jaar eerder, dan blijkt dat deze daling 1 procentpunt meer is dan in 2030 en 1 procentpunt minder dan in 2025. De scenario's van 2025 hebben dus de grootste dalingen tussen de locatiescenario's met 60% en 40% thuisladers. Het aantal zones die geen laadbehoefte ervaren neemt ook in dit

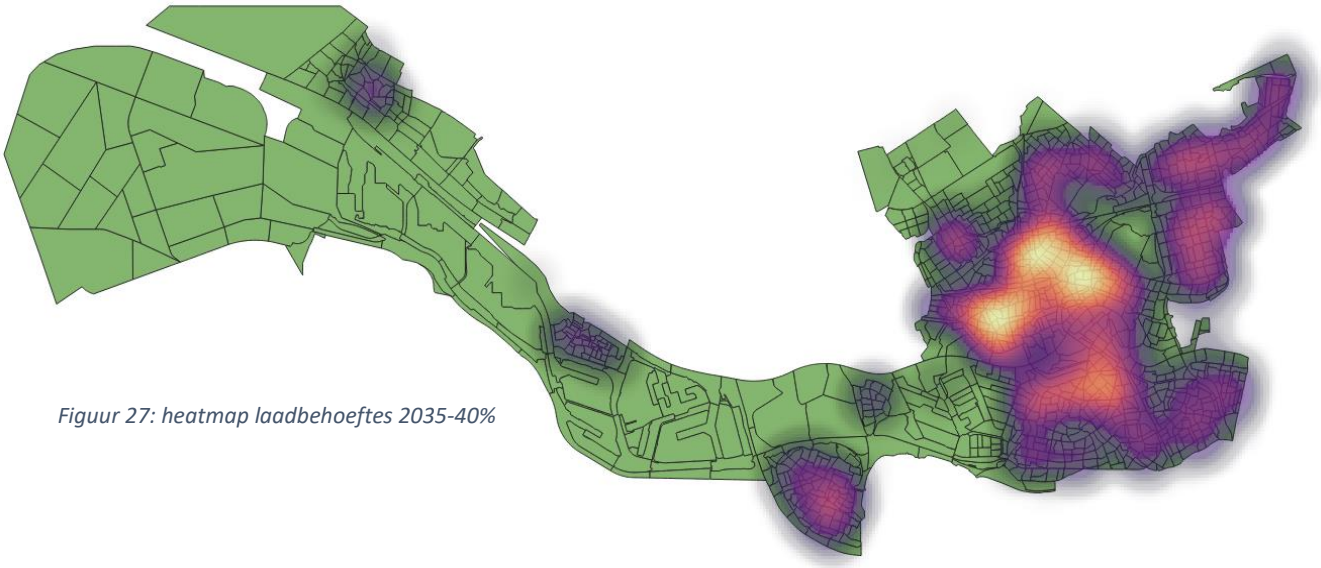


Figuur 26: zone 5368

scenario van 2035 met 40% thuisladers weer enigszins toe naar 519, met een stijging van 17 die nagenoeg gelijk is aan de stijging tussen de vorige twee locatiescenario's. In het huidige scenario blijkt ook dat weer een andere zone de hoogste laadbehoefte ervaart met 231,5 kWh per dag voor zonenummer 5368. Deze zone bevindt zich in de wijk Bergpolder in Rotterdam-Noord, zie figuur 26. Zone 5368 bevat het hoogste aantal woningen van alle zones en staat qua inwoners in de top 4. Ook zijn aan deze zone de meeste elektrische voertuigen toegewezen in dit scenario. Zodoende is het een logisch gevolg dat in het huidige scenario, waar bij de toewijzing van elektrische voertuigen het minste aantal personen zijn verwijderd uit de data, deze zone de hoogste laadbehoefte ervaart. Als gekeken wordt naar het verloop van de laadbehoefte in deze zone, dan valt op dat de piek relatief vroeg op de dag ligt, namelijk rond het middaguur. Ook is te zien dat de laadbehoeftes voornamelijk tussen 9u 's ochtends en 21u 's avonds worden voldaan, zie grafiek 28. Ook is voor het huidige scenario een heatmap opgesteld welke weergeeft hoe de hotspots van laadbehoeftes zich verdelen over de verschillende zones in de gemeente Rotterdam, zie figuur 27. Weer is te zien dat de laadbehoefte zich voornamelijk concentreert in het centrum ten noorden van de Nieuwe Maas, en ook enigszins ten zuiden van de Nieuwe Maas. Ten opzichte van de adoptiescenario's van vijf en tien jaar eerder blijft het effect zichtbaar dat de omliggende gebieden een minder grote concentratie van laadbehoeftes ervaren. Vergeleken met de vorige locatiescenario's van 2035 is er wederom geen groot verschil te zien, enkel in het centrum zijn de concentraties van laadbehoeftes ietwat meer uitgespreid.

Grafiek 28





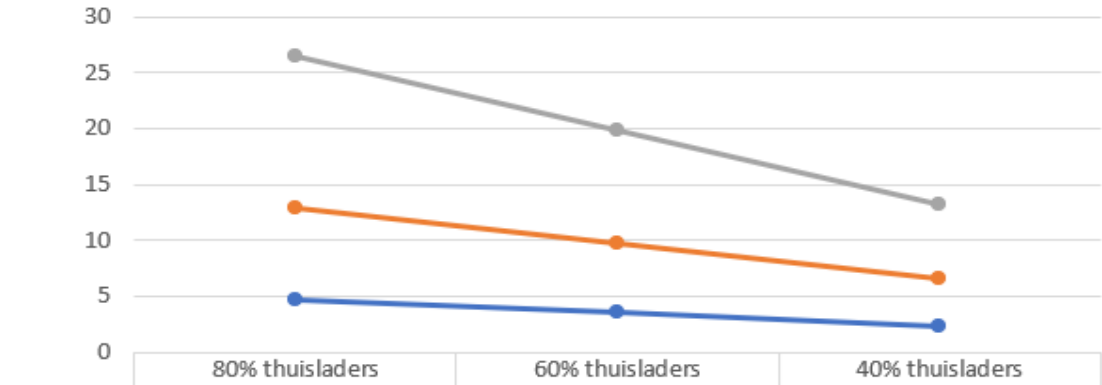
Figuur 27: heatmap laadbehoeftes 2035-40%

5. Conclusie

In dit onderzoek is een methode uitgevoerd om de toekomstige ontwikkeling van de publieke laadbehoefte in de gemeente Rotterdam in Nederland in totaal en per zone te bepalen. Hiervoor zijn in het activiteiten gebaseerde transportmodel FEATHERS verschillende adoptie- en locatiescenario's geanalyseerd om via de activiteitenpatronen van personen te bepalen wat hun bijbehorende laadbehoefte zal zijn. Hierbij is uitgegaan van drie verschillende adoptiescenario's en ook van drie verschillende locatiescenario's. De adoptiescenario's zijn opgesteld voor de jaren 2025, 2030 en 2035. In de locatiescenario's is bepaald hoeveel mensen in de buurt van thuis laden en hoeveel mensen bij het werk laden en daarom verwijderd zijn uit de data. Hierbij gaat het om 80%, 60% en 40% thuisladers.

Uit de resultaten blijkt dat de totale laadbehoefte over alle zones in de gemeente Rotterdam voor elk adoptiescenario flink toeneemt. In 2025 met 80% thuisladers wordt de publieke laadbehoefte 13.000 kWh per dag, waarna deze toeneemt tot 35.000 kWh per dag in 2030 en tot 73.000 kWh per dag in 2035. Voor de alternatieve locatiescenario's blijkt dat de publieke laadbehoefte van 80% naar 60% binnen elk adoptiescenario telkens met ongeveer een kwart daalt. De dalingen van de publieke laadbehoeftes tussen de locatiescenario's van 60% en 40% bedragen telkens ongeveer een derde voor elk van de adoptiescenario's van 2025, 2030 en 2035. In grafiek 29 is het verloop van de totale jaarlijkse publieke laadbehoefte te zien voor de gemeente Rotterdam en voor elk scenario. In 2018 bedroeg de jaarlijkse laadbehoefte in de gemeente Rotterdam ongeveer 4,4 miljoen kWh, echter is dit aantal inclusief werkladers en snelladers. Te zien is dat de gemeente Rotterdam een behoorlijke toename aan laadbehoeftes kan verwachten in de komende jaren. Vooral na 2025 zal de laadbehoefte meer gaan toenemen. Ook blijkt dat er een grotere toename in laadbehoefte te zien is naar het scenario van 2035 toe dan naar het scenario van 2030. Tevens is de absolute afname tussen de verschillende locatiescenario's groter in het 2035 scenario dan in de andere twee adoptiescenario's.

Grafiek 29 Totale laadbehoefte (miljoen kWh) per jaar

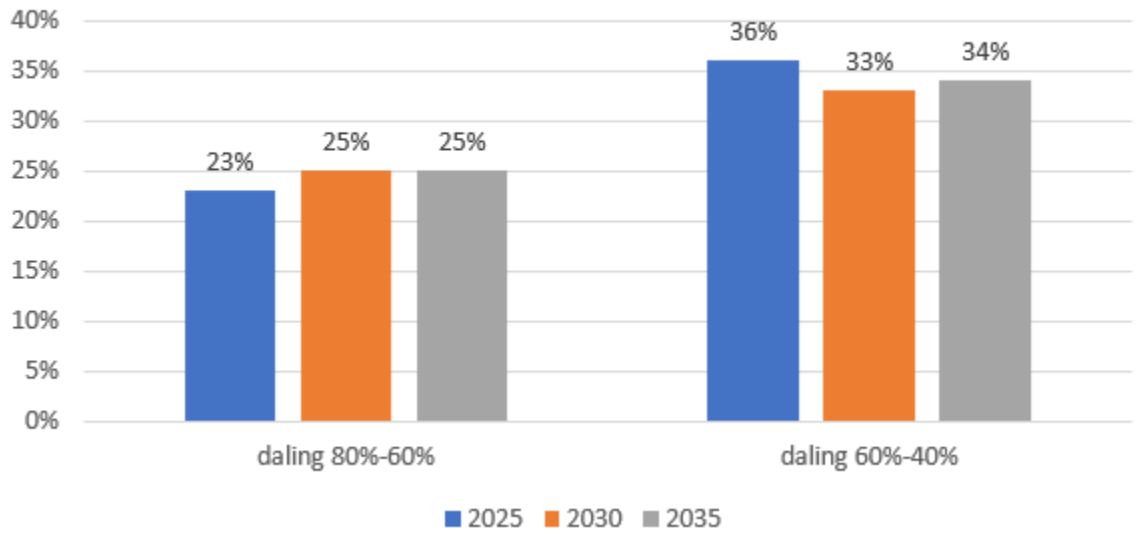


	80% thuisladers	60% thuisladers	40% thuisladers
2025	4,7	3,6	2,35
2030	12,9	9,7	6,5
2035	26,5	19,9	13,2

Als gekeken wordt naar de relatieve procentuele dalingen van de totale laadbehoeftes tussen locatiescenario's en binnen de adoptiescenario's, dan blijkt dat deze zowel voor de daling van 80% naar 60% als van 60% naar 40% thuisladers onderling ruwweg overeenkomen. Echter zijn er wel kleine verschillen te zien. Het blijkt dat de daling van 80% naar 60% thuisladers in het 2025 scenario het kleinste

is, met 23%. Binnen de overige adoptiescenario's is een daling van 25% te zien. De daling van 60% naar 40% thuisladers blijkt juist het grootste te zijn in het 2025 scenario, met 36%, ten opzichte van 33% en 34% voor de 2030 en 2035 scenario's. Dit resultaat wijst uit dat het effect van meer personen die bij werk laden bij een toename van 20% naar 40% (oftewel een daling in thuisladers van 80% naar 60%), het kleinst is tijdens het 2025 scenario en dat tijdens dit adoptiescenario relatief een ietwat grotere publieke laadbehoefte nabij thuis overblijft t.o.v. de andere twee adoptiescenario's van 2030 en 2035. Voor de toename van werkladers van 40% naar 60% (oftewel een daling in thuisladers van 60% naar 40%) blijkt het omgekeerde; dit zorgt voor de grootste daling in publieke laadbehoefte nabij thuis tijdens het 2025 scenario met 36%, ten opzichte van 33% en 34% voor de andere adoptiescenario's. Er blijft dus een wat kleinere publieke laadbehoefte over voor deze toename van werkladers in 2025 t.o.v. de andere adoptiescenario's. Zie grafiek 30.

Grafiek 30 Procentuele daling totale laadbehoefte



De resultaten voor de laadbehoeftes per zone per dag in de gemeente Rotterdam variëren per dag en per scenario. Gemiddeld genomen per zone blijkt dat deze voor 80% thuisladers stijgt van 9,4 kWh in 2025 naar 52,6 kWh in 2035. Met 60% thuisladers stijgt deze van 7,2 kWh naar uiteindelijk 39,5 kWh en met 40% thuisladers van 4,7 kWh naar 26,2 kWh. In tabel 10 zijn deze gemiddelde laadbehoeftes per zone zichtbaar voor elk scenario. De groeiverhoudingen komen echter goed overeen met de verhoudingen van de totale laadbehoeftes zoals weergegeven grafiek 29. Ook de procentuele afnames voor de gemiddelde laadbehoefte per zone tussen de locatiescenario's komen overeen met de verhoudingen zoals weergegeven in grafiek 30, waarbij het 2025 scenario de laagste daling ervaart in gemiddelde laadbehoefte per zone als de werkladers stijgen van 20% naar 40% en waarbij het 2025 scenario wederom de hoogste daling ervaart als de werkladers stijgen van 40% naar 60%.

Tabel 10: gemiddelde laadbehoefte (kWh) per zone per dag voor alle scenario's

Scenario	**80% thuisladers**	**60% thuisladers**	**40% thuisladers**
2025	9,4	7,2	4,7
2030	25,5	19,2	12,9
2035	52,6	39,5	26,2

Uit dit onderzoek is gebleken dat de publieke laadbehoefte in de gemeente Rotterdam behoorlijk zal gaan stijgen in de komende vijftien jaar, als de adoptie van elektrische voertuigen verder zal blijven toenemen zoals beschreven in de verschillende prognoses in sectie 2.1. Hierbij geldt dat de totale jaarlijkse laadbehoefte in de gemeente Rotterdam van ongeveer 4,4 miljoen kWh in 2018 voor de locatiescenario's met 80% thuisladers zal stijgen tot minstens 4,7 miljoen kWh in 2025, 12,9 miljoen kWh in 2030 en 26,5 miljoen kWh in 2035. Dit omdat bij deze voorspellingen de groep personen die bij werk laden verwijderd zijn uit de data, alsook bevatten deze behoeftes niet de laadbehoeftes voortkomend uit bezoekersladen bij, voornamelijk, snelladers. Zodoende representeren deze voorspellingen de totale verwachte laadbehoeftes voor publiek laden die voortkomen uit bewonersladen en voldaan worden nabij de thuislocatie van de bestuurders van een elektrisch voertuig.

6. Discussie

Tijdens dit onderzoek is gebruik gemaakt van het activiteiten-gebaseerde transportmodel FEATHERS om verschillende toekomstige adoptie- en locatiescenario's te analyseren en om zo de toekomstige laadbehoefte voor elektrische voertuigen in een bepaald gebied te bepalen, in dit geval de gemeente Rotterdam. Er kan gesteld worden dat de uitkomsten die verkregen zijn uit dit model valide zijn doordat FEATHERS via een gedeeltelijk stochastisch proces modelleert en op macroscopisch niveau hoge accuraatheid vertoont in vergelijking met verzamelde *real-life* data. Zou dit onderzoek opnieuw worden uitgevoerd, dan zal blijken dat de resultaten macroscopisch gezien nagenoeg vergelijkbaar zijn.

Uit de analyse van de output van FEATHERS via de verschillende scenario's bleek dat de laadbehoefte in gemeente Rotterdam de komende jaren behoorlijk zal stijgen tot enkele tientallen miljoenen kWh per jaar. Deze uitkomst komt overeen met de verwachting dat de laadbehoefte en dus de adoptie van elektrische voertuigen exponentieel zal blijven stijgen de komende tijd. Uit cijfers van de afgelopen jaren was al duidelijk dat adoptie steeds sneller ging en ook de dalende productie- en componentkosten, de groeiende subsidiemogelijkheden en de bekende prognoses uit de literatuur wijzen op een steeds groter wordende laadbehoefte. Ook is deze uitkomst mogelijk te verklaren door het huidige veranderende sociale klimaat waar duurzaamheid en focus op minder uitstoot om klimaatverandering tegen te gaan steeds meer naar de voorgrond komen. Verder bleek uit de analyses van de output van FEATHERS dat de laadbehoeftes vaak minimaal zijn in de nacht, wat kan komen doordat tijdens de gemodelleerde dag op dat vroege tijdstip van de dag nog maar weinig kilometers zijn afgelegd door personen met een elektrisch voertuig. Dit kan ook verklaren dat de maxima het vaakst te zien zijn richting het einde van de middag, wanneer personen al vaak een bepaalde afstand hebben afgelegd en deze laadbehoefte zodoende willen voldoen wanneer zij weer thuis zijn. Een andere uitkomst was dat het 2025 scenario relatief een grotere daling in laadbehoefte ervaarde wanneer de thuisladers daalden van 60% naar 40% dan van 80% naar 60%. Dit houdt in dat als meer mensen bij werk laden in 2025, dit zorgt voor een ietwat kleinere publieke laadbehoefte ten opzichte van de scenario's die verder in de toekomst liggen. Daarnaast bleek uit de verschillende heatmaps dat in het 2035 scenario de laadbehoeftes zich relatief meer in het centrum van de stad concentreerden, wat kan komen doordat in dat scenario geen personen met bepaalde eigenschappen zoals laagste inkomensniveau, opleidingsniveau of autobezit zijn verwijderd en dat deze personen meer juist meer in dat gebied wonen (Gemeente Rotterdam, 2020b).

Het uitgevoerde onderzoek is een aanvulling op de bestaande literatuur doordat er een activiteiten-gebaseerd transportmodel is gebruikt in combinatie met het rekening houden met personen die thuis een privé laadpunt kunnen realiseren en zonder dat mogelijke locaties waar laadbehoeftes zich kunnen concentreren van tevoren vastgesteld zijn. Zodoende laat dit onderzoek zien wat de totaal aanwezige laadbehoefte bedraagt in de komende jaren, aangenomen dat men hun activiteitenpatroon niet verandert en zonder rekening te houden met fysieke of institutionele beperkingen. Praktisch geeft dit het betreffende gebied, in dit geval de gemeente Rotterdam, een duidelijk beeld van de te verwachten laadbehoefte per zone. Op basis hiervan wordt aanbevolen dat de gemeente Rotterdam rekening houdt met deze ontwikkeling van laadbehoeftes zodat hierop ingespeeld kan worden in het plaatsingsbeleid en bij de uitrol van laadinfrastructuur.

In dit onderzoek is geen rekening gehouden met de privélaadmogelijkheid. Dit zou een beperking zijn, zou het niet zo zijn dat Rotterdam een hoog stedelijk gebied is en dat dit daarom een verwaarloosbaar aantal representeert. Voor minder stedelijke, en meer landelijke, gebieden zou het rekening houden met de

privélaadmogelijkheid wel meer van belang zijn. Ook is in dit onderzoek alleen uitgegaan van de publieke laadbehoefte die voortkomt uit de behoefte van personen met een elektrisch voertuig die thuisladen (oftewel bewonersladen) en in Rotterdam wonen. Bezoekersladen bij snelladers en laden bij werk is buiten beschouwing gelaten. Verder onderzoek zou zich daarom kunnen richten op het bepalen van deze laadbehoeftes. Daarnaast is in dit onderzoek rekening gehouden met de toewijzing van elektrische voertuigen door geselecteerde personen met bepaalde eigenschappen te verwijderen uit de data aangezien van deze groep werd geacht zij in een bepaald adoptiescenario een lage kans zouden hebben om een elektrisch voertuig aan te schaffen, waarna de voertuigen willekeurig aan de overgebleven personen zijn toebedeeld. Vervolgonderzoek kan zich focussen op het exacter bepalen van het adoptieverloop zodat de toewijzing van elektrische voertuigen een nog realistischer beeld kan laten zien.

Een andere beperking van dit onderzoek is dat de laadbehoeftes voorspeld zijn op basis van de vervoersvraag die voortkomt uit één dag en dat deze laadbehoefte vervolgens ook op die dag wordt voldaan. Dit komt doordat het FEATHERS-model het gedrag van personen over één dag modelleert. Realistisch gezien zal niet iedere persoon met een elektrisch voertuig dit elke dag opladen maar ook niet pas als de batterij bijna leeg is. Op microniveau betekent dit voor een persoon een groot verschil, oftewel bijvoorbeeld pas na vier dagen opladen of elke dag. Echter, op macroniveau blijft de laadbehoefte per dag nagenoeg gelijk aangezien de gereden kilometers en dus de laadbehoefte na vier dagen dan ook ruwweg vier keer zo groot worden. Gemiddeld gezien is er daardoor nauwelijks verschil. Desalniettemin kan vervolgonderzoek zich richten op het modelleren van een langere periode, zodat ook rekening kan worden gehouden met het beperkte bereik van elektrische voertuigen, aangezien dit in het huidige onderzoek niet binnen één dag doorbroken wordt. Verder is in dit onderzoek gewerkt met een compensatiefactor op basis van de populatieverhouding omdat in FEATHERS het gedrag van personen voor de stadsregio Rotterdam is gemodelleerd en vervolgens ook aan deze regio de geprognotiseerde adoptie aantallen zijn toegewezen. Vervolgens zijn de zones die niet bij de gemeente Rotterdam horen verwijderd uit de data en is een compensatiefactor toegepast op de overgebleven zones om macroscopisch gezien toch op de geprognotiseerde aantallen van elektrische voertuigen en de hieruit volgende toekomstige laadbehoeftes uit te komen. Vervolgonderzoek zou kunnen focussen op puur en alleen de gemeente Rotterdam zodat een compensatiefactor niet meer nodig zal zijn. Ook kan verder onderzoek uitgevoerd worden om het aantal benodigde laadpalen te bepalen dat voortkomt uit de bepaalde laadbehoeftes, door rekening te houden met hoeveel personen met een elektrisch voertuig tegelijk in een zone willen opladen.

7. Referenties

Akkerhuis, J. (2020). *Aantal EV Rijders Rotterdam* [Personal communication].

Antonini, G., Bierlaire, M., & Weber, M. (2006). Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, *40*(8), 667–687. https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.09.006

ANWB. (2018). *Elektrisch Rijden Monitor 2018*. ANWB. https://www.anwb.nl/binaries/content/assets/anwb/pdf/belangenbehartiging/mobiliteit/rapport-erm-def.pdf

ANWB. (2019). *Historie elektrische auto*. /auto/themas/elektrisch-rijden/elektrische-autos/historie-elektrische-auto

ANWB. (2020). *Factsheet autobelastingen*. ANWB. https://www.anwb.nl/binaries/content/assets/anwb/pdf/auto/themas/autobelastingen/20190101-autobrief-versie-2.pdf

Arentze, T., & Timmermans, H. (2004). A learning-based transportation oriented simulation system. *Transportation Research Part B: Methodological*, *38*(7), 613–633. https://doi.org/10.1016/j.trb.2002.10.001

Arentze, T., Timmermans, H., Hofman, F., & Kalfs, N. (2000). Data Needs, Data Collection and Data Quality Requirements of Activity-Based Transport Demand Models. *Transportation Research Circular*. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec008/workshop_j.pdf

Autokopen.nl. (2009). *Autobelastingen 2009: Wat verandert er?* https://www.autokopen.nl/autonieuws/2009/januari/13777-

autobelastingen-2009-wat-verandert-er

AutoRAI. (2019, October 15). *Dit zijn de autobelastingplannen voor 2020*. AutoRAI.nl. https://autorai.nl/autobelastingplannen-2020/

Autoweek. (2019). *Autovergelijker—Powered by CarBase. Bekijk en vergelijk nieuwe auto's of auto's van de afgelopen 38 jaar*. AutoWeek. https://www.autoweek.nl/carbase/

Autowereld. (2009). *Autobelastingen 2010: Wat verandert er voor de automobilist?* Autowereld.com. https://www.autowereld.com/nieuws/autonieuws/id/8745/autobelastingen-2010-wat-verandert-er-voor-de-automobilist

Beckx, C., Int Panis, L., Uljee, I., Arentze, T., Janssens, D., & Wets, G. (2009). Disaggregation of nation-wide dynamic population exposure estimates in The Netherlands: Applications of activity-based transport models. *Atmospheric Environment*, *43*(34), 5454–5462. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.035

Beckx, C., Panis, L. I., Vankerkom, J., Janssens, D., Wets, G., & Arentze, T. (2009). An Integrated Activity-Based Modelling Framework to Assess Vehicle Emissions: Approach and Application: *Environment and Planning B: Planning and Design*. https://doi.org/10.1068/b35044

Belastingdienst. (2014). *Oude bpm-tarieven (vanaf 1993)* (p. 42). https://www.automotiveimport.nl/wp-content/uploads/2015/05/bpm_oude_tarieven_bpm0651z1fd.pdf

Bellemans, T., Janssens, D., & Wets, G. (2009). *DOORREKENEN VAN BELEIDSMAATREGELEN MET*

HET FEATHERSACTIVITEITEN-GEBASEERDE MODEL. Belgisch Wegencongres, Diepenbeek. http://www.abr-bwv.be/sites/default/files/VI.A.8..pdf

Ben-Akiva, M. E., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press.

Bloomberg. (2019, April 12). Electric Car Price Tag Shrinks Along With Battery Cost. *Bloomberg.Com*. https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2019-04-12/electric-vehicle-battery-shrinks-and-so-does-the-total-cost

BloombergNEF. (2019, March 5). *A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices*. BloombergNEF. https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/

Bowman, J. L., & Ben-Akiva, M. E. (2001). Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *35*(1), 1–28. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00043-9

CBS. (2016). *Vier op de tien huishoudens wonen in een rijtjeshuis* [Webpagina]. Centraal Bureau voor de Statistiek. https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/14/vier-op-de-tien-huishoudens-wonen-in-een-rijtjeshuis

CBS. (2019a). *Kooldioxide* [Webpagina]. Centraal Bureau voor de Statistiek. https://www.cbs.nl/nl-nl/maatschappij/verkeer-en-vervoer/transport-en-mobiliteit/energie-en-milieu/milieuaspecten-van-verkeer-en-vervoer/categorie-milieuaspecten/kooldioxide

CBS. (2019b). *Landbouwexport ruim 90 miljard euro in 2018* [Webpagina]. Centraal Bureau voor de Statistiek. https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/03/landbouwexport-ruim-90-miljard-euro-in-2018

CBS. (2019c). *StatLine—Personenauto's; voertuigkenmerken, regio's, 1 januari*. https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/71405NED/table?fromstatweb

CBS. (2019d). *StatLine—Regionale kerncijfers Nederland*. https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70072NED/table?dl=2096B

CBS. (2019e). *Welke sectoren stoten broeikasgassen uit?* [Webpagina]. Centraal Bureau voor de Statistiek. https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/dossier-broeikasgassen/hoofdcategorieen/welke-sectoren-stoten-broeikasgassen-uit-

CBS. (2020). *StatLine—Regionale kerncijfers Nederland*. https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70072ned/table?ts=1583499558717

CHAdeMo. (2018). CHAdeMO releases the latest version of the protocol enabling up to 400KW. *Chademo Association*. https://www.chademo.com/chademo-releases-the-latest-version-of-the-protocol-enabling-up-to-400kw/

Cleantechnica. (2019, October 5). *Tesla Vehicle Efficiency Leads Industry Thanks To Tesla Vehicle Design Culture*. CleanTechnica. https://cleantechnica.com/2019/10/05/tesla-vehicle-efficiency-leads-industry-thanks-to-tesla-vehicle-design-culture/

de Romph, E., Kochan, B., & Clerx, W. (2018). *Groei van de steden prikkelt modelbouwers!* 15. https://cvs-congres.nl/e2/site/cvs/custom/site/upload/file/cvs_2018/id_192_erik_de_romph_activity_based_model_rotterdam_abmr.pdf

Department of Energy. (2014). *The History of the Electric Car*. Energy.Gov. https://www.energy.gov/articles/history-electric-car

Dong, J., Liu, C., & Lin, Z. (2014). Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *38*, 44–55. https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.11.001

Ecofys. (2016). *Toekomstverkenning elektrisch vervoer* (p. 66). Ecofys. https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2016/12/06/eindrapport-toekomstverkenning-elektrisch-vervoer/eindrapport-toekomstverkenning-elektrisch-vervoer.pdf

ElaadNL. (2012). *eViolin opgericht—Elaad NL*. https://www.elaad.nl/news/laadpunte xploitanten-en-laaddienstverleners-richten-vereniging-interoperabel-laden-nl-op-eviolin/

ElaadNL. (2019a). *EV Outlook*. https://www.elaad.nl/uploads/files/ElaadNL_Outlook_EVs_Laadpunten.pdf

ElaadNL. (2019b). *Prognose Laadinfrastructuur personenauto's*. https://www.elaad.nl/uploads/files/Factsheets-NAL/Factsheet-NAL-Prognose-laadinfrastructuur-personenautos-ElaadNL.pdf

Elsevier. (2019, October 22). *Na boerenprotest volgt bouwprotest: "Den Haag lamleggen" - Elsevier Weekblad*. Elsevierweekblad.nl. https://www.elsevierweekblad.nl/nederland/achtergrond/2019/10/na-boerenprotest-volgt-bouwprotest-dit-moet-u-weten-716388/

Engadget. (2018). *Will Tesla open up its Supercharger network in Europe?* Engadget. https://www.engadget.com/2018/11/16/tesla-superchargers-europe-ccs-cable/

Eurlings, C. M. P. S., & van der Hoeven, M. J. A. (2009). *Tweede Kamer der Staten-Generaal 31305 nr. 145—Mobiliteitsbeleid Elektrisch Rijden*. https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Kamerbrief%20Plan%20van%20aanpak%20Elektrisch%20Rijden.pdf

EV Database. (2017, September 1). *Praktische actieradius van een elektrische auto*. EV Database Blog. https://ev-database.nl/blog/praktische-actieradius-elektrische-auto/

EV Database. (2019a). *Aandrijving en prestaties van een elektrische auto*. EV Database. https://ev-database.nl/informatie/aandrijving-prestaties-elektrische-auto

EV Database. (2019b). *Opladen van een elektrische auto*. EV Database. https://ev-database.nl/

EV Database. (2020). *Archief Elektrische Voertuigen*. EV Database. https://ev-database.nl/vergelijk/tweedehands-occasion-elektrische-auto-archief

EVBox. (2020). *EVBox PublicLine Specificaties*. https://branding.evbox.com/web/4e05cd0712294611/nl-technische-

specificaties/?mediaId=3B7A668F-5729-4583-B545F9C6CAE2A031

EVConsult. (2019). *EVMonitor*. Google Data Studio. http://datastudio.google.com/reporting/1sqzGyjORyvtlp8bpyiAGYWYlyl2nkH-N/page/ljQX?feature=opengraph

Fastned. (2018). *Everything you've always wanted to know about fast charging*. Fastned. http://fastned.nl/nl/blog/post/everything-you-ve-always-wanted-to-know-about-fast-charging

Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., & Antunes, A. P. (2011). Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, *2252*(1), 91–98. https://doi.org/10.3141/2252-12

Gemeente Rotterdam. (2015). *Kader voor de plaatsing van laadinfrastructuur voor elektrische auto's*. https://www.nklnederland.nl/kennisloket/wp-content/uploads/2019/06/SGZH-Kader-elektrisch-rijden-Rotterdam-2015-2016.pdf

Gemeente Rotterdam. (2019). *Feiten en cijfers over elektrisch rijden in Rotterdam* (p. 1). https://www.rotterdam.nl/wonen-leven/elektrisch-rijden/Feiten-en-cijfers-over-elektrisch-rijden-in-Rotterdam.pdf

Gemeente Rotterdam. (2020a). *Gisweb Rotterdam* [GIS]. https://www.gis.rotterdam.nl/gisweb2/default.aspx

Gemeente Rotterdam. (2020b). *Wijkprofiel Rotterdam*. https://wijkprofiel.rotterdam.nl/nl/2020/rotterdam

Gemeente Utrecht. (2020). *WistUdata | Gemeente Utrecht—WistUdata |*

Gemeente Utrecht—Buurten. https://wistudata.nl/jive?workspace_guid=9cda1b35-35e6-4f10-aebb-79e4f5f1edd2

González, J., Alvaro, R., Gamallo, C., Fuentes, M., Fraile-Ardanuy, J., Knapen, L., & Janssens, D. (2014). Determining Electric Vehicle Charging Point Locations Considering Drivers' Daily Activities. *Procedia Computer Science*, *32*, 647–654. https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.472

Green Deals. (2011a). *Elektrisch Rijden | Green Deal 005*. https://www.greendeals.nl/green-deals/elektrisch-rijden

Green Deals. (2011b). *Infrastructuur voor Elektrisch Vervoer | Green Deal 022*. https://www.greendeals.nl/green-deals/infrastructuur-voor-elektrisch-vervoer

Green Deals. (2015). *Openbaar toegankelijke elektrische Laadinfrastructuur | Green Deal 185*. https://www.greendeals.nl/green-deals/openbaar-toegankelijke-elektrische-laadinfrastructuur

Green Deals. (2016). *Elektrisch Vervoer 2016—2020 | Green Deal 198*. https://www.greendeals.nl/green-deals/elektrisch-vervoer-2016-2020

Greendeals. (2019). *Home | Greendeals*. https://www.greendeals.nl/

Guarnieri, M. (2012). Looking back to electric cars. *2012 Third IEEE HISTory of ELectro-Technology CONference (HISTELCON)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2012.6487583

Hatzopoulou, M., & Miller, E. J. (2010). Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's

contribution to air pollution in Toronto. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *15*(6), 315–325. https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.03.007

He, F., Wu, D., Yin, Y., & Guan, Y. (2013). Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, *47*, 87–101. https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.09.007

Hoekstra, A. (2017). *Nieuwe inzichten over elektrisch vervoer in Nederland*. TU Eindhoven. http://sparkcity.org/files/Nieuwe_inzichten_over_elektrisch_vervoer_in_Nederland.pdf

IEA. (2019). *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. OECD. https://doi.org/10.1787/35fb60bd-en

ING. (2017). *Electric car threatens European car industry*. ING Website. https://www.ing.nl/zakelijk/kennis-over-de-economie/uw-sector/automotive/electric-car-threatens-european-car-industry.html

InsideEVs. (2018). *Tesla's Efficiency Edge Speaks Volumes For Its Engineering Lead*. InsideEvs.Com. https://insideevs.com/news/340676/teslas-efficiency-edge-speaks-volumes-for-its-engineering-lead/

Klimaatakkoord. (2019a). *Nationale Agenda Laadinfrastructuur*. https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/achtergrondnotitie-mobiliteit-laadinfrastructuur/Nationale+Agenda+Laadinfrastructuur.pdf

Klimaatakkoord. (2019b, August 6). *Het Akkoord—Klimaatakkoord* [Webpagina]. https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord

Klimaatakkoord. (2019c, November 1). *Kabinet neemt extra klimaatmaatregelen—Nieuwsbericht—Klimaatakkoord* [Nieuwsbericht]. https://www.klimaatakkoord.nl/actueel/nieuws/2019/11/01/kabinet-neemt-extra-klimaatmaatregelen

Klimaatmonitor. (2019). *Klimaatmonitor—Mobiliteit—Gemeenten*. https://klimaatmonitor.databank.nl/Jive

Knapen, L., Kochan, B., Bellemans, T., Janssens, D., & Wets, G. (2012). Activity-Based Modeling to Predict Spatial and Temporal Power Demand of Electric Vehicles in Flanders, Belgium. *Transportation Research Record*, *2287*(1), 146–154. https://doi.org/10.3141/2287-18

Kuby, M., Lines, L., Schultz, R., Xie, Z., Kim, J.-G., & Lim, S. (2009). Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model. *International Journal of Hydrogen Energy*, *34*(15), 6045–6064. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.050

Kwink Groep. (2016). *Terugblik en vooruitblik op het beleid voor elektrisch vervoer—Een analyse van het "Plan van aanpak: Elektrisch rijden in de versnelling."* Kwink Groep. https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2016/02/10/terugblik-en-vooruitblik-op-het-beleid-voor-elektrisch-vervoer/20160323_Terugblik+en+vo

oruitblik+op+het+beleid+voor+elektrisch+vervoer_....pdf

Lin, Z., Ogden, J., Fan, Y., & Chen, C.-W. (2008). The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting. *International Journal of Hydrogen Energy*, *33*(12), 3096–3101. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.040

Nederland Elektrisch. (2019a). *Nederland Elektrisch—Cijfers en statistieken EV's in Nederland*. https://nederlandelektrisch.nl/actueel/verkoopcijfers

Nederland Elektrisch. (2019b). *Nederland Elektrisch—Plug-in hybride (PHEV)*. https://nederlandelektrisch.nl/technologie/aandrijftechnieken/plug-in-hybride-phev

Nicholas, M. A., Handy, S. L., & Sperling, D. (2004). Using Geographic Information Systems to Evaluate Siting and Networks of Hydrogen Stations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1880*(1), 126–134. https://doi.org/10.3141/1880-15

NKL. (2017). *Openbare laadinfrastructuur Elektrisch Vervoer*. https://www.nklnederland.nl/uploads/files/Kencijfers_Laadinfrastructuur_2017_NKL_onderzoeksverslag_mei_2017_1.pdf

NKL. (2019). *Handreiking visie & beleid laadinfrastructuur elektrisch vervoer*. https://www.nklnederland.nl/kennisloket/wp-content/uploads/2019/10/Handreiking-visie-en-beleid-okt-2019.pdf

NU.nl. (2019, August 12). *Deze betaalbare elektrische auto's komen eraan*. NU. https://www.nu.nl/auto/5973758/deze-betaalbare-elektrische-autos-komen-eraan.html

Oplaadpunten.nl. (2019). *Oplaadpunten.nl*. https://www.oplaadpunten.nl

Overheid. (2020). *Overheid.nl | Consultatie Subsidieregeling elektrisch vervoer*. Subsidieregeling elektrisch vervoer. https://www.internetconsultatie.nl/subsidieregeling_elektrisch_rijden

Pan, F., Bent, R., Berscheid, A., & Izraelevitz, D. (2010). Locating PHEV Exchange Stations in V2G. *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 173–178. https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622037

Panis, L. I., Beckx, C., & Wets, G. (2009). Socio-Economic Class and Exposure to NO2 Air Pollution in the Netherlands. *Epidemiology*, *20*(6), S19. https://doi.org/10.1097/01.ede.0000362234.56425.2c

PBL. (2019, October 30). *Het Klimaatakkoord: Effecten en aandachtspunten* [Text]. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. https://www.pbl.nl/publicaties/het-klimaatakkoord-effecten-en-aandachtspunten

PBL, & KNMI. (2015). *Klimaatverandering—Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland*. PBL / KNMI. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/PBL_KNMI_2015_Klimaatverandering_Samenvatting_van_het_vijfde_IPCC-assessment_1405.pdf

Rabobank. (2018). *Mobiliteitsupdate februari 2018—Rabobank*. https://www.rabobank.nl/bedrijven/cijfers-en-trends/mobiliteit/update-februari-2018/

Riemersma Leasing. (2016). Bijtelling: Wat is er in 10 jaar veranderd? *Riemersma Leasing*. https://www.riemersmaleasing.nl/nieuws/bijtelling-is-er-10-jaar-veranderd/

Rijksoverheid. (2011, December 14). *Green Deal aanpak—Duurzame economie—Rijksoverheid.nl* [Onderwerp]. Rijksoverheid. https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-economie/green-deal

Rijksoverheid. (2018). *Ontwerp Klimaatakkoord*. https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2018/12/21/mobiliteit/Ontwerp+van+het+Klimaatakkoord_complee t_web_C2+mobiliteit.pdf

Rijksoverheid. (2019a). *Klimaatakkoord*. Rijksoverheid. https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord/klimaatakkoord.pdf

Rijksoverheid. (2019b). *Klimaatbeleid—Klimaatverandering—Rijksoverheid.nl* [Onderwerp]. https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid

Rijksoverheid. (2019c, November 13). *Maatregelen om stikstofprobleem op te lossen—Aanpak stikstof—Rijksoverheid.nl* [Onderwerp]. Ministerie van Algemene Zaken. https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/aanpak-stikstof/maatregelen-om-stikstofprobleem-op-te-lossen

RIVM. (2019). *Stikstof | RIVM*. https://www.rivm.nl/stikstof

RTL Nieuws. (2019, November 9). *Autoloze zondag*. RTL Nieuws. https://www.rtlnieuws.nl/columns/co

lumn/4915186/stikstof-pas-autoloze-zondag-joop-den-uyl

RVO. (2011). *Plan van Aanpak—Elektrisch rijden in de versnelling (2011-2015)*. RVO. https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Plan%20van%20aanpak%20-elektrisch%20rijden%20in%20de%20versnelling-.pdf

RVO. (2020). *Statistics Electric Vehicles in the Netherlands—Up to February 2020*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-en-milieu-innovaties/elektrisch-rijden/stand-van-zaken/cijfers

Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Kazemi-Karegar, H. (2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, *125*, 289–299. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.077

Sathaye, N., & Kelley, S. (2013). An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *59*, 15–33. https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.08.003

Shahraki, N., Cai, H., Turkay, M., & Xu, M. (2015). Optimal locations of electric public charging stations using real world vehicle travel patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *41*, 165–176. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.011

Sikkema, A. (2019, September 25). *De stikstofproblematiek in vijf vragen*. resource.wageningenur.nl. https://resource.wur.nl/nl/wetenschap

/show/De-stikstofproblematiek-in-vijf-vragen-.htm

Spoelstra, J. (2014). *Laadgedrag van Nederlandse elektrische rijders* [Utrecht University]. https://nederlandelektrisch.nl/u/files/special-laadgedrag.pdf

Steinbuch, M. (2016, January 22). Schatting verkopen Elektrisch Vervoer Nederland t/m 2025. *Steinbuch*. https://steinbuch.wordpress.com/2016/01/22/schatting-verkopen-elektrisch-vervoer-nederland-tm-2025/

Stephan, C., & Sullivan, J. (2004). *Growth of a hydrogen transportation infrastructure*.

Sweda, T., & Klabjan, D. (2011). An agent-based decision support system for electric vehicle charging infrastructure deployment. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–5. https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043201

TNO. (2015). *Energie- en milieu-aspecten van elektrische personenvoertuigen*. TNO. https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/04/TNO%20Factsheets%20Elektrische%20Voertuigen.pdf

TNO. (2019). *Factsheet—Emissies en depositie van stikstof in Nederland*. TNO. http://publications.tno.nl/publication/34634850/8Pywsn/TNO-2019-emissies.pdf

Tweakers. (2018a). *BMW en Porsche demonstreren 450kW-station dat auto in kwartier laadt*. Tweakers. https://tweakers.net/nieuws/146923/bmw-en-porsche-demonstreren-450kw-station-dat-auto-in-kwartier-laadt.html

Tweakers. (2018b). *Fastned opent eerste snellaadstation met 350kW-lader in*

Nederland. Tweakers. https://tweakers.net/nieuws/135851/fastned-opent-eerste-snellaadstation-met-350kw-lader-in-nederland.html

UCS. (2018). *Electric Vehicle Batteries: Materials, Cost, Lifespan*. Union of Concerned Scientists. https://www.ucsusa.org/resources/ev-batteries

UNFCC. (2019). *UNFCCC Process | UNFCCC*. United Nations Climate Change. https://unfccc.int/process-and-meetings#:d8f74df9-0dbd-4932-bf3c-d8a37f8de70e

van Leeuwen, J. (2019). *Toekomstverkenning Elektrisch Vervoer en Laadpaalbehoefte* [Internship report]. Hasselt University.

van Montfort, K., Visser, J., van der Poel, G., & van den Hoed, R. (2016). *Voorspellen van benodigde infrastructuur van publieke laadpalen voor elektrische auto's*. 12.

Volkskrant. (2019a, June 7). *Nederland heeft zowat de hoogste stikstofvervuiling ter wereld – Klopt dit wel?* de Volkskrant. https://www.volkskrant.nl/gs-b579862c

Volkskrant. (2019b, July 23). *Wat is er schadelijk aan stikstof en waarom moet het beperkt worden?* de Volkskrant. https://www.volkskrant.nl/gs-bd2ec760

Wang, H., Huang, Q., Zhang, C., & Xia, A. (2010). A novel approach for the layout of electric vehicle charging station. *The 2010 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis Proceeding*, 64–70. https://doi.org/10.1109/ICACIA.2010.5709852

Wang, Y.-W., & Lin, C.-C. (2009). Locating road-vehicle refueling stations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *45*(5), 821–829. https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.03.002

Xi, X., Sioshansi, R., & Marano, V. (2013). Simulation–optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *22*, 60–69. https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.02.014