

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/130411>

Please be advised that this information was generated on 2021-06-20 and may be subject to change.

De mogelijke impact van in-car informatie op stedelijk parkeergedrag

Geert Tasseron

Radboud Universiteit Nijmegen¹

Karel Martens

Radboud Universiteit Nijmegen²

Rob van der Heijden

Radboud Universiteit Nijmegen³

Informatievoorziening aan automobilisten over de beschikbaarheid van parkeerplaatsen kan potentieel nuttig zijn bij het verminderen van de zoektijd van de individuele automobilist en daaropvolgend het verkeer in zijn geheel. De meeste steden voorzien automobilisten inmiddels van informatie over de bezettingsgraad van parkeergarages en parkeerterreinen, maar informatie over losse straatparkeerplaatsen was tot voor kort niet beschikbaar. Het doel van deze paper is te onderzoeken wat de impact is van bottom-up informatievoorziening over straatparkeerplaatsen op de prestaties van de individuele automobilist als zowel het verkeer in het geheel. Met behulp van een agent-based simulatie worden de prestaties vergeleken tussen een bottom-up vehicle-to-vehicle communicatie strategie versus een strategie waarbij parkeersensoren tezamen met vehicle-to-vehicle communicatie worden toegepast. In de laatste benadering worden straatparkeerplaatsen uitgerust met sensoren die in staat zijn om informatie met betrekking tot de huidige status te verstrekken. In tegenstelling tot de verwachtingen laten de resultaten zien dat, voor beide strategieën, zoektijd nauwelijks of niet afneemt. Resultaten op het gebied van loopafstand laten zien dat bij een vehicle-to-vehicle strategie de prestaties alleen verbeteren in situaties met een extreem hoge bezettingsgraad. Daarentegen neemt de loopafstand bij het gebruik van sensoren drastisch af onder alle omstandigheden. De maatschappelijke baten van bottom-up informatie voorzieningen staan dus niet bij voorbaat vast.

Trefwoorden: Agent-based system; Informatie verstrekking; Intelligent transport systeem; Parkeren; Sensoren; V2V

1. Inleiding

Onderzoek heeft uitgewezen dat het aandeel voertuigen dat op zoek is naar een parkeerplaats groter kan zijn dan één derde van alle voertuigen in grote stadscentra (Shoup, 2005). Door ofwel het aantal voertuigen dat op zoek is naar een parkeerplaats te verminderen, of de algehele

¹ Radboud Universiteit Nijmegen, E: g.tasseron@fm.ru.nl

² Radboud Universiteit Nijmegen, E: k.martens@fm.ru.nl

³ Radboud Universiteit Nijmegen, E: r.vanderheijden@fm.ru.nl

zoektijd per voertuig te verlagen is het mogelijk om de ongewenste effecten van dit fenomeen terug te brengen, hieronder vallen vervuiling en verspilling van middelen (tijd en brandstof). Het verstrekken van informatie aan automobilisten over beschikbare parkeerplaatsen op straat kan een manier zijn om dit bereiken (van Ommeren et al., 2012). Dergelijke informatie kan mogelijk gunstig zijn voor het algehele systeem van alle automobilisten bij elkaar als wel de individuele automobilist.

De meeste steden verschaffen automobilisten al informatie over de bezettingsgraad van off-street parkeervoorzieningen, onderzoek naar voorkeuren van automobilisten en de rol van informatie bij het vinden van deze voorzieningen is reeds onderzocht (o.a. Van der Waerden et al., 2011) en gemodelleerd (Van der Waerden et al., 2002). Er is ook een redelijke verscheidenheid aan onderzoek waarbij met behulp van modellen parkeergedrag op straat is onderzocht (o.a. D'Acerno et al., 2006; Li et al., 2012; Arnott & Inci, 2006). Ruimtelijk onderzoek over de effecten van informatie over de straatbezetting op het gedrag van automobilisten is schaars (Boehlé et al., 2008), mede doordat informatie over de bezettingsgraad op straat tot voor kort niet beschikbaar was. Dit is echter snel aan het veranderen door de opkomst van een aantal (start-up) bedrijven dat dit soort informatie verstrekt door gebruik te maken van de hoge penetratie van smartphones en in-car navigatiesystemen (LA Express Park, Park.it, Streetline: Parker Mobile). Het doel van deze paper is om te onderzoeken of informatieverstrekking over straatparkeerplaatsen inderdaad de zoektijd kan verlagen voor het verkeerssysteem als geheel als wel de individuele automobilist.

Er zijn een aantal technologieën beschikbaar om informatie over straatparkeerplaatsen aan automobilisten beschikbaar te stellen. Een mogelijkheid is het gebruik van vehicle-to-vehicle communicatie met behulp van Vehicle Ad-hoc Networks (VANETs) (Leontiadis & Mascolo, 2007; Prinz et al., 2009). VANETs bieden een manier om informatie tussen knooppunten in een netwerk met behulp van bottom-up verspreiding te delen. Gelet op hun kenmerken, zijn VANETs zeer geschikt voor de verspreiding van informatie over straatparkeerplaatsen. Het netwerk wordt gevormd door mobiele eenheden (in ons geval voertuigen) die de mogelijkheid hebben om gegevens via draadloze technieken (bijvoorbeeld dedicated short-range communication, DSRC) te verzenden en ontvangen. Vanwege het beperkte bereik van deze technologie én door het feit dat de informatie maar korte tijd nuttig is, worden deze netwerken aangeduid als 'ad-hoc'. VANETs hebben het voordeel dat ze informatie kunnen verzamelen en verspreiden op een dynamische en snelle manier, wat cruciaal is aangezien de beschikbaarheid van straatparkeerplaatsen onderhevig is aan frequente veranderingen. Een ander belangrijk aspect van VANETs is de manier waarop informatie wordt verspreid. VANETs zorgen voor een bottom-up verspreiding van informatie in plaats van een gecentraliseerde verspreiding. Bottom-up verspreiding zorgt ervoor dat het systeem robuust is en niet afhankelijk van een centraal orgaan (organisatie of rekencentrum) dat zorg draagt voor het verzamelen en beschikbaar stellen van informatie aan voertuigen in het netwerk.

Naast vehicle-to-vehicle (V2V) communicatie zijn er enkele afgeleiden die kunnen worden gebruikt in een VANET informatiebeheer context. Hieronder vallen vehicle-to-infrastructure (V2I) communicatie, een hybride architectuur waarbij gebruikt wordt gemaakt van zowel V2V als wel V2I, en meer recent vehicle-to-pedestrian communicatie (V2P) (Liu et al., 2010).

Hoewel een aantal onderzoeken de mogelijke bijdrage van V2V-communicatie tot het beheer van het wegverkeer hebben geanalyseerd (ElBatt et al., 2006; Tasseron & Schut, 2009; Wischhof et al., 2005) en er enkele studies bestaan die de technische haalbaarheid in een parkeercontext hebben onderzocht (Caliskan et al., 2006; Delot et al., 2009; Szczurek, Bo Xu, et al., 2010; Szczurek, B Xu, et al., 2010; Vaghela & Shah, 2011), bestaat er geen onderzoek waarin is gekeken of V2V-communicatie daadwerkelijk kan leiden tot een optimalisatie van parkeerdynamiek. Dit document heeft tot doel om deze leemte te vullen door het onderzoeken van de impact van bottom-up informatie verstrekking op de prestatie van individuele automobilisten en op het systeem als geheel. We vergelijken een bottom-up strategie waarin alleen voertuigen informatie

kunnen verzenden en ontvangen (V2V-communicatie) met een strategie waarbij (naast de voertuigen) sensoren in parkeerplaatsen ook de mogelijkheid hebben om de huidige status te verspreiden (vanaf nu genoemd S2V (sensor-to-vehicle) communicatie).

Deze paper is als volgt ingedeeld. Na deze introductie beschrijven we de manier waarop automobilisten geïnformeerd worden over beschikbare parkeerplaatsen met behulp van de V2V en S2V communicatie strategieën (sectie 2). In sectie 3 beschrijven we zowel de simulatieopzet als PARKAGENT, de agent-based simulatie tool die we gebruiken om de simulaties te draaien. Sectie 4 behandelt de resultaten van de verschillende simulatieruns. We eindigen met de conclusies en de vervolgstappen van ons onderzoek (sectie 5).

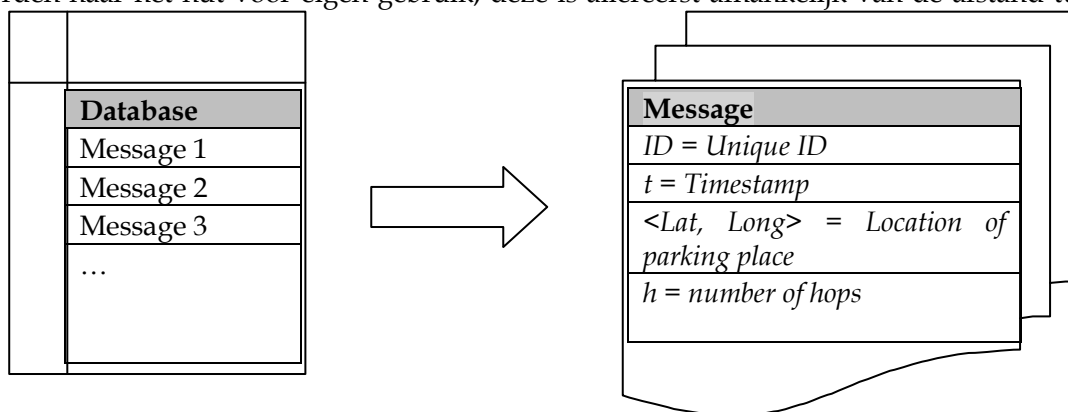
2. Bottom-up informatie verstrekking

In deze sectie beschrijven we de manier waarop informatie over de beschikbaarheid van straatparkeerplaatsen uitgewisseld wordt bij beide strategieën, dus zowel voor V2V als S2V. Daarnaast bespreken we welke informatie gecommuniceerd wordt. Het is belangrijk om op te merken dat we tijdens de simulaties onderscheid maken tussen voertuigen die kunnen communiceren (V2V) en voertuigen die dat niet kunnen. V2V-voertuigen kunnen berichten binnen een vast zendbereik van 200 meter verzenden en ontvangen, dit is aangetoond als zijnde een praktische haalbare transmissieafstand, zelfs onder niet-optimale omstandigheden (Demmel et al., 2012). Er bestaan verschillende methoden om berichten uit te wisselen tussen entiteiten. In dit onderzoek maken we gebruik van een verspreidingsmethode middels burens, ook bekend als het roddel protocol (Das et al., 2004; Tasseron & Schut, 2009). Deze methode wordt primair gebruikt omdat deze eenvoudig is. Ten tweede moet informatie over parkeren in alle richtingen worden verspreid, in tegenstelling tot toepassingen met betrekking tot bijvoorbeeld file informatie waarbij alleen informatie stroom opwaarts nuttig is. Ten derde, ons doel is om te laten zien of het überhaupt zinvol is om informatie te delen, niet om de meeste efficiënte methode te vinden om informatie te verspreiden. In het V2V scenario zal een V2V-auto een bericht sturen zodra het een parkeerplaats verlaat. In het S2V scenario zal de sensor dit bericht versturen. Het verschil tussen beide strategieën is substantieel, in het V2V scenario wordt het bericht over de beschikbaarheid maar één keer verstuurd, terwijl in het S2V scenario de sensor dit bericht op regelmatige intervallen blijft versturen. In beide gevallen worden de berichten ontvangen door alle V2V-voertuigen binnen het zendbereik, die op hun beurt het bericht door geven aan alle V2V-voertuigen binnen hun zendbereik. Belangrijk om op te merken is dat in het V2V scenario onbezette parkeerplaatsen in de beginsituatie van de simulatie én vertrekkende niet-V2V-voertuigen niet zal leiden tot het ontstaan van een bericht. In het S2V scenario wordt een bericht altijd gemaakt en verspreid bij beschikbaarheid van de parkeerplaats.

In de tweede serie experimenten wordt de parkeersensor geïntroduceerd. Deze sensor is in staat om de huidige status, beschikbaar of niet beschikbaar, door te geven aan voertuigen in de nabijheid. De sensoren zullen hun status alleen doorgeven aan nabijgelegen voertuigen als hun status op beschikbaar staat, dat wil zeggen de parkeerplaats is onbezet. Sensoren hebben hetzelfde zendbereik als V2V-auto's. Voor zover wij weten hebben sensoren in het echt (nog) niet de mogelijkheid om rechtstreeks te communiceren met voertuigen. Ze zijn normaal gesproken verbonden met een artefact in de infrastructuur, zoals een parkeermeter of een lantaarnpaal, die op haar beurt kan communiceren met voertuigen (V2I). Hoewel dit dus een onrealistische aanname is om het model te vereenvoudigen, zal het algehele proces niet verschillen met een model waarbij gebruik wordt gemaakt van een lantaarnpaal of parkeermeter.

Een bericht bestaat uit een aantal attributen (figuur 1): een uniek ID, de timestamp, het moment waarop de parkeerplaats beschikbaar kwam, (2) de locatie, die is opgeslagen als een coördinatenpaar en (3) het aantal 'hops'. Een hop is de overdracht van een bericht van de ene auto naar de andere. Een hop is de overdracht van een bericht van de ene auto naar de andere. Het aantal hops vertegenwoordigt als dusdanig het aantal keren dat een melding is doorgegeven aan een andere auto.

Elke V2V-voertuig dat een bericht over een beschikbare parkeerplaats ontvangt zal deze daarna verwerken. Als de automobilist op zoek is naar een parkeerplaats zal de boodschap gerangschikt worden naar het nut voor eigen gebruik, deze is allereerst afhankelijk van de afstand tussen de



Figuur 1. Database en bericht attributen

parkeerplaats en de eindbestemming van de automobilist. Als het bericht van nut kan zijn, wordt het bericht opgeslagen in een database en gerangschikt volgens de relatieve waarde (v) van de parkeerplaats volgens de werkwijze weergegeven in figuur 2. De waarde is gebaseerd op de locatie en de leeftijd van het bericht (zie Vergelijking 1). Een hogere waarde van v betekent een minder aantrekkelijke parkeerplaats.

$$v = \frac{d_c}{V_{car}} + \frac{d_w}{V_{walk}} + \alpha \cdot h + \beta \cdot t \quad (1)$$

Waarbij:

d_c = afstand tussen de huidige positie en de parkeerplaats

d_w = afstand tussen de parkeerplaats en de eindbestemming

V_{car} = snelheid van voertuigen die op zoek zijn naar een parkeerplaats

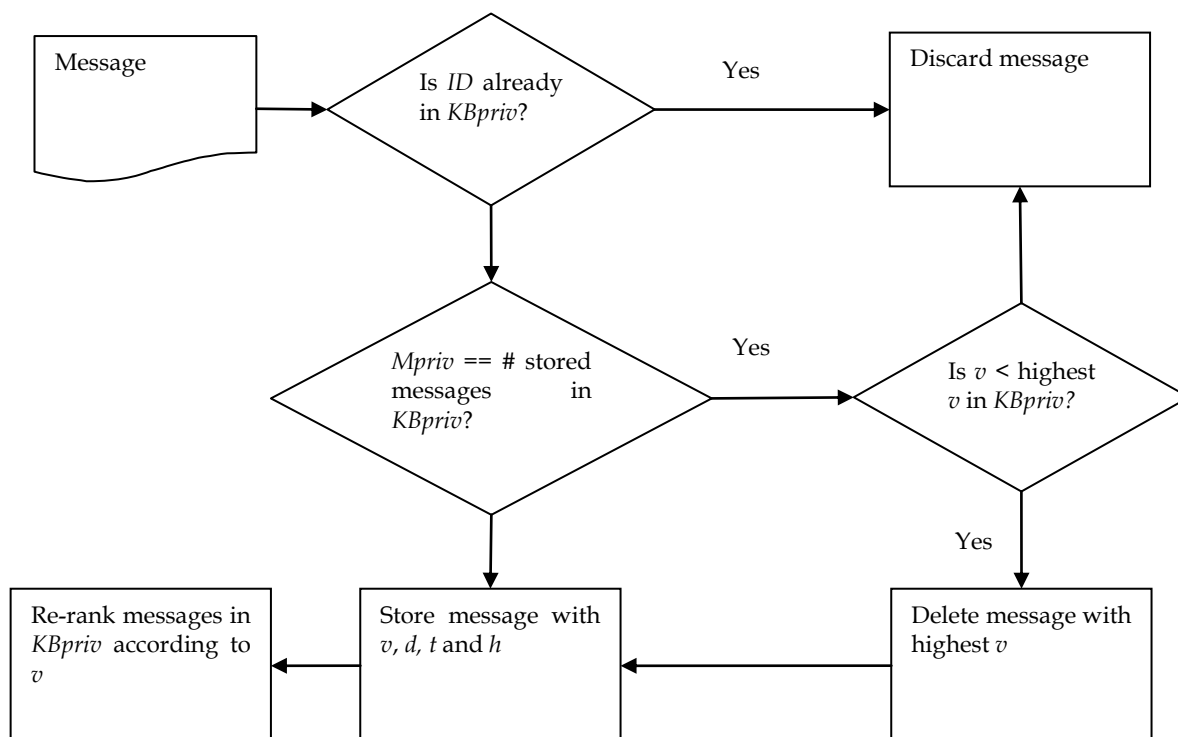
V_{walk} = loopsnelheid

h = hops

t = tijdstip waarop bericht is aangemaakt (of geupdate)

α and β zijn de respectievelijke gewichten voor hops en tijd

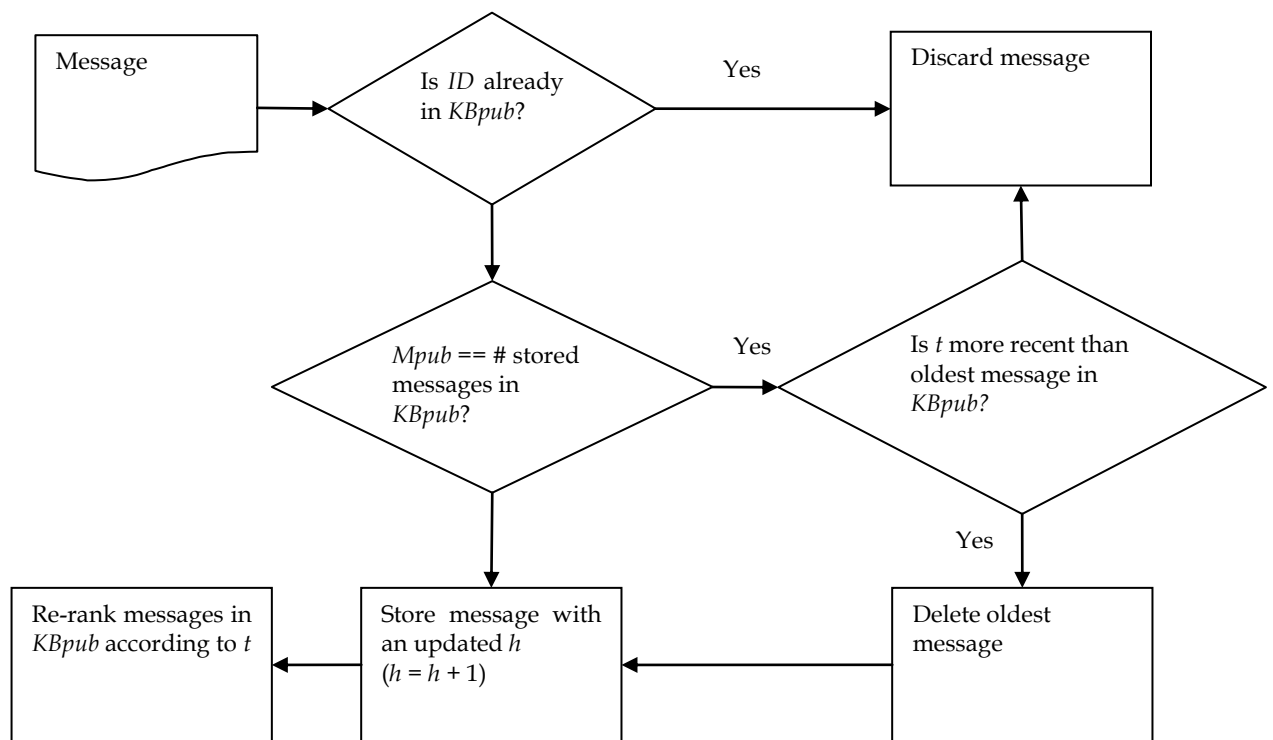
Elk V2V-voertuig is uitgerust met twee databases die berichten kunnen opslaan, een interne database (KB_{priv}) en een openbare database (KB_{pub}). The interne database (zie Figuur 2) heeft een gelimiteerde capaciteit ($M_{priv} = \text{Max. aantal bewaarde interne berichten}$). Als het aantal berichten in de database het maximum heeft bereikt en het nieuwe bericht heeft een betere score dan het slechtst scorende bericht uit de database, dan zal dit nieuwe bericht het slechtst scorende bericht vervangen.



Figuur 2. Proces voor het opslaan van berichten in de interne database

Naast de interne database heeft elke V2V-auto ook een openbare database voor algemeen gebruik (zie Figuur 3). Deze openbare database bevat een gelimiteerd aantal ($M_{pub} = \text{max. aantal opgeslagen openbare berichten}$) berichten, die worden gerangschikt volgens hun leeftijd. Wanneer de database de maximale capaciteit heeft bereikt, vervangt het nieuw ontvangen bericht het oudste bericht in de database mits het nieuwe bericht een recenter is. Naast het verwerken van de ontvangen berichten versturen de voertuigen alle berichten in hun openbare database op geregelde basis naar voertuigen die binnen het zendbereik vallen. Via deze methode kunnen berichten over beschikbare parkeerplaatsen het gebied in een korte periode doorkruisen en op deze manier veel automobilisten voorzien van informatie over de beschikbaarheid van parkeerplaatsen.

Het is belangrijk om op te merken dat de hierboven beschreven methode niet voorziet in een reserveringssysteem. Zodoende is het mogelijk dat bij het arriveren bij een aangeraden parkeerplaats, deze inmiddels is ingenomen door een andere auto, hetzij een V2V-auto, hetzij een niet-V2V-auto. Bovendien dient er rekening mee gehouden te worden dat de interne en openbare databases kunnen overlappen, dat wil zeggen berichten die geschikt zijn bevonden voor eigen gebruik kunnen tegelijkertijd ook verstuurd worden aan medeweggebruikers, en dus potentiële concurrenten voor dezelfde parkeerplaats.



Figuur 3. Proces voor het opslaan van berichten in de openbare database

3. Simulatie beschrijving

We bestuderen de effecten van bottom-up informatieverstopping op parkeerdynamiek met behulp van PARKAGENT, een geavanceerd agent-based simulatiemodel. De basis kenmerken van PARKAGENT zijn beschreven in een aantal papers (Benenson & Martens, 2008; Benenson et al., 2008). Voor de analyse van de parkeerdynamiek als gevolg van bottom-up informatievoorziening gebruiken we grotendeels de simulatieopzet zoals deze is beschreven in Levy et al. (Levy et al., 2012). Het stratenetwerk dat wordt gebruikt in de simulaties is dat van een raster (11 x 11 blokken, 12 bestemmingen en 96 parkeerplaatsen op de binnenring van elke blok). Dit netwerk lijkt niet alleen op de plattegronden van veel Amerikaanse steden, het biedt ook de beste omgeving voor het systematisch analyseren van de parkeerdynamiek. Straatparkeerplaatsen zijn evenredig verdeeld langs de straten in het netwerk, er zijn geen off-street voorzieningen aanwezig. Bestemmingen (de gebouwen), zijn eveneens gelijkmatig verdeeld over de ruimte. Op het moment dat een aankomende agent (voertuig) wordt geïnitieerd zal deze een willekeurige bestemming als doel ontvangen. Het startpunt van de trip is willekeurig gekozen uit een set die bestaat uit alle straatlocaties die op 400 meter van de eindbestemming liggen. De route tussen landingspunt en de eindbestemming wordt berekend op basis van het kortste pad algoritme van Dijkstra. De snelheid van de voertuigen is standaard 28 km/uur, zodra de automobilist overschakelt op het zoeken naar een parkeerplaats (op 300 meter van de eindbestemming), wordt de snelheid verlaagd naar 14 km/uur. Deze snelheid is in eerder onderzoek vastgesteld als zijnde realistisch voor automobilisten die actief naar vrije parkeerplaatsen zoeken (Benenson et al., 2008). De loopsnelheid is vastgesteld op een gemiddelde van 5 km/uur. De gewichten van de α en β component in vergelijking 1 zijn relatief laag gehouden ($\alpha = 1$ en $\beta = 0.1$) en blijven hetzelfde gedurende alle experimenten. Dit houdt in dat afstand, tussen de parkeerplaats en de eindbestemming en tussen de huidige positie en de parkeerplaats, sterk de waardering van de parkeerplaats bepalen (zie sectie 4.3 voor een gevoeligheidsanalyse over deze twee componenten).

De keuze heuristisch met betrekking tot een parkeerplaats verschilt niet veel tussen een normale automobilist en een automobilist van een V2V-auto. Normale automobilisten maken gebruik van de in PARKAGENT al bestaande zoekheuristiek. Deze heuristiek laat de automobilist de bezettingsgraad langs de straten bijhouden onder het rijden. De automobilist zal met behulp van deze informatie, tezamen met de huidige afstand tot de eindbestemming, het verwachte aantal beschikbare parkeerplaatsen inschatten. Hoe lager de schatting hoe groter de kans dat de agent de eerstvolgende beschikbare parkeerplaats zal innemen. Wanneer de automobilist het aantal heeft overschat, of er waren überhaupt geen beschikbare plaatsen, dan zal de automobilist de eindbestemming bereiken zonder een parkeerplaats gevonden te hebben. Vanaf dat moment zal de chauffeur cirkelvormige bewegingen rondom de eindbestemming maken op zoek naar een lege plek, ondertussen wordt de zoekcirkel langzaam uitgebreid. V2V-automobilisten maken gebruik van dezelfde heuristiek, maar schatten het aantal verwachte parkeerplaatsen met één parkeerplaats hoger in als ze op weg zijn naar een aangeraden parkeerplaats. Aangezien de agent weet dat er een extra plek beschikbaar is, zijnde de parkeerplaats waarover informatie is ontvangen. Wanneer een V2V-auto aankomt bij de parkeerplaats en deze is ondertussen bezet door een andere automobilist dan wordt gekozen voor de tweede beste parkeerplaats in de interne database en verandert de route dienovereenkomstig. Mocht de interne database leeg zijn, dan valt de automobilist terug op het normale gedrag en zoekt een parkeerplaats door het maken van cirkelvormige bewegingen rondom de eindbestemming.

De onafhankelijke variabelen die gebruikt worden zijn de initiële bezettingsgraad en de penetratiegraad van auto's die uitgerust zijn met V2V mogelijkheden. De initiële bezettingsgraad is het percentage van parkeerplaatsen die bezet zijn bij de start van de simulatie. De bezettingsgraad blijft min of meer gelijk gedurende elke simulatie periode. Aangezien het aantal voertuigen dat een parkeerplaats verlaat gelijk is aan het aantal voertuigen dat het simulatie gebied binnenkomt. Tijdens de simulaties zullen alleen de situaties worden beschouwd met een initiële bezettingsgraad van 90% en hoger, omdat deze de voorwaarden creëren waaronder het vinden van een vrije parkeerplaats een lastige exercitie is. Naast de bezettingsgraad, heeft de omzetsnelheid ook invloed op de parkeerdynamiek. In het parkeerdomein is de omzetsnelheid het aantal keren dat een parkeerplaats wordt ingenomen door verschillende voertuigen binnen een bepaald tijdsbestek. Hoge omzetsnelheden zorgen ervoor dat automobilisten eenvoudiger een plek kunnen vinden. Tijdens de simulaties wordt er niet gevarieerd in de omzetsnelheid. Aankomende voertuigen zullen gedurende de gehele simulatie periode geparkeerd blijven staan, initieel geparkeerde voertuigen vertrekken uniform verdeeld over de simulatie periode.

De parkeerprestaties worden gemeten met behulp van loopafstand, zoektijd en algeheel bestede tijd. In de literatuur wordt zoektijd meestal aangeduid als de tijd die nodig is om een parkeerplaats te vinden zodra de automobilist is gearriveerd in het bestemmingsgebied in het geval van straatparkeren (Shoup, 2005; Dieussaert et al., 2009; Gallo et al., 2011; Arnott & Inci, 2006), en als wachttijd bij een parkeergarage (Van Ommeren et al., 2010). Het bestemmingsgebied is een vage term en helpt als dusdanig niet bij het duidelijk definiëren van de term zoektijd. De meest heldere definiëring is gemaakt door Martens et al.: "*Het zoeken naar een parkeerplaats vindt plaats zodra een automobilist de bestemming is gepasseerd zonder een parkeerplek te hebben gevonden*" (vrij vertaald uit het Engels) (Martens et al., 2010). In dit onderzoek gebruiken we vergelijkbare aanpak, al vindt er een kleine nuancering plaats. We definiëren zoektijd als de extra tijd die nodig is om een parkeerplaats te vinden in vergelijking met de meest optimale reistijd tot de meest optimale parkeerplaats. In de huidige simulatieopzet is de meest optimale parkeerplaats de parkeerplaats die direct naast de eindbestemming ligt. De optimale reistijd is gedefinieerd als de tijd die nodig is voor een automobilist om van het startpunt tot aan de meest optimale parkeerplaats te rijden onder optimale omstandigheden (kortste route en geen congestie). Alle automobilisten die binnen deze tijdsduur parkeren op de optimale parkeerplaats of op weg naar de bestemming een parkeerplaats vinden krijgen een zoektijd van 0.

De derde afhankelijke variabele bestaat uit de combinatie van looptijd en zoektijd. Deze algehele bestede tijd wordt berekend volgens vergelijking 2.

$$\text{Bestede tijd} = 2 \cdot \frac{d_w}{V_{walk}} + St \quad (2)$$

Met:

d_w = hemelsbrede afstand tussen de parkeerplaats en de eindbestemming

V_{walk} = loopsnelheid

St = zoektijd

De looptijd wordt met twee vermenigvuldigd aangezien deze afstand twee maal dient afgelegd te worden, op weg naar de bestemming en wederom op de weg terug naar de auto.

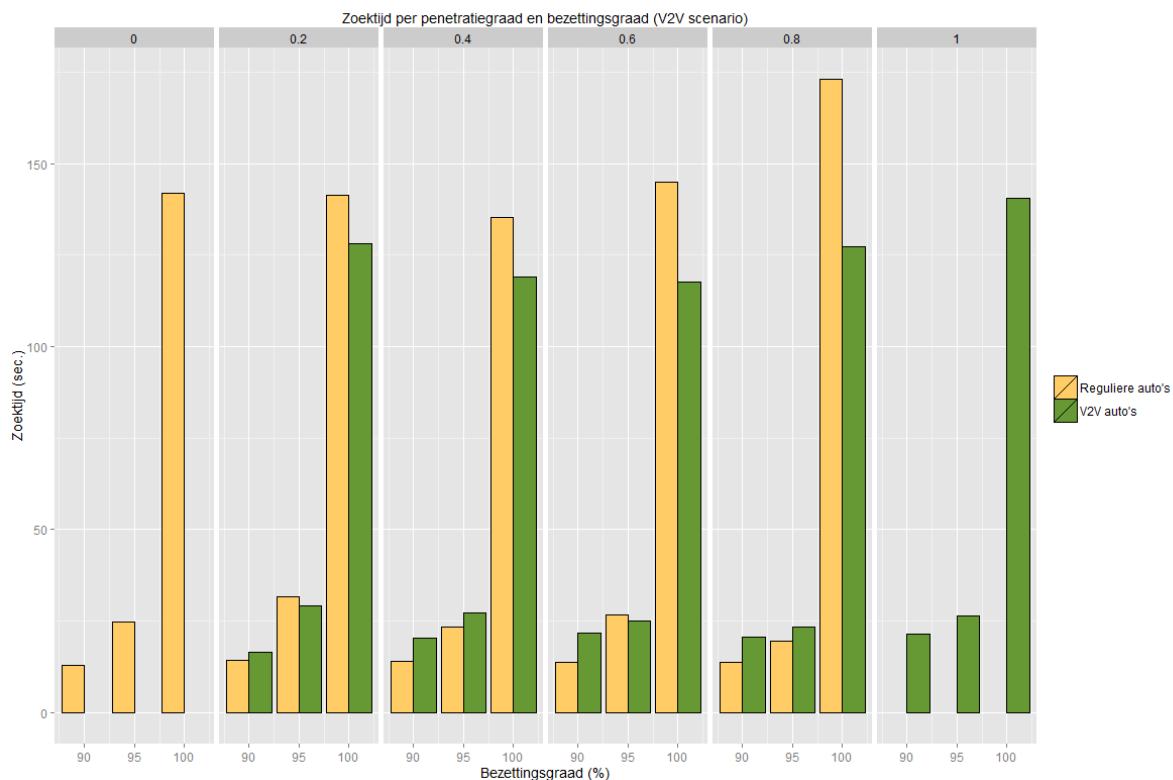
4. Resultaten

De resultaten met betrekking tot de prestaties van V2V voertuigen in vergelijking met normale voertuigen en de resultaten van het algehele systeem van alle voertuigen wordt hieronder beschreven. Het eerste deel behandelt de resultaten voor het scenario waarbij alleen gebruik wordt gemaakt van verspreiding middels V2V-voertuigen. Het tweede deel bespreekt de resultaten waarbij parkeerplaatsen met sensoren worden uitgerust.

4.1 Vehicle-to-vehicle informatie verstrekking

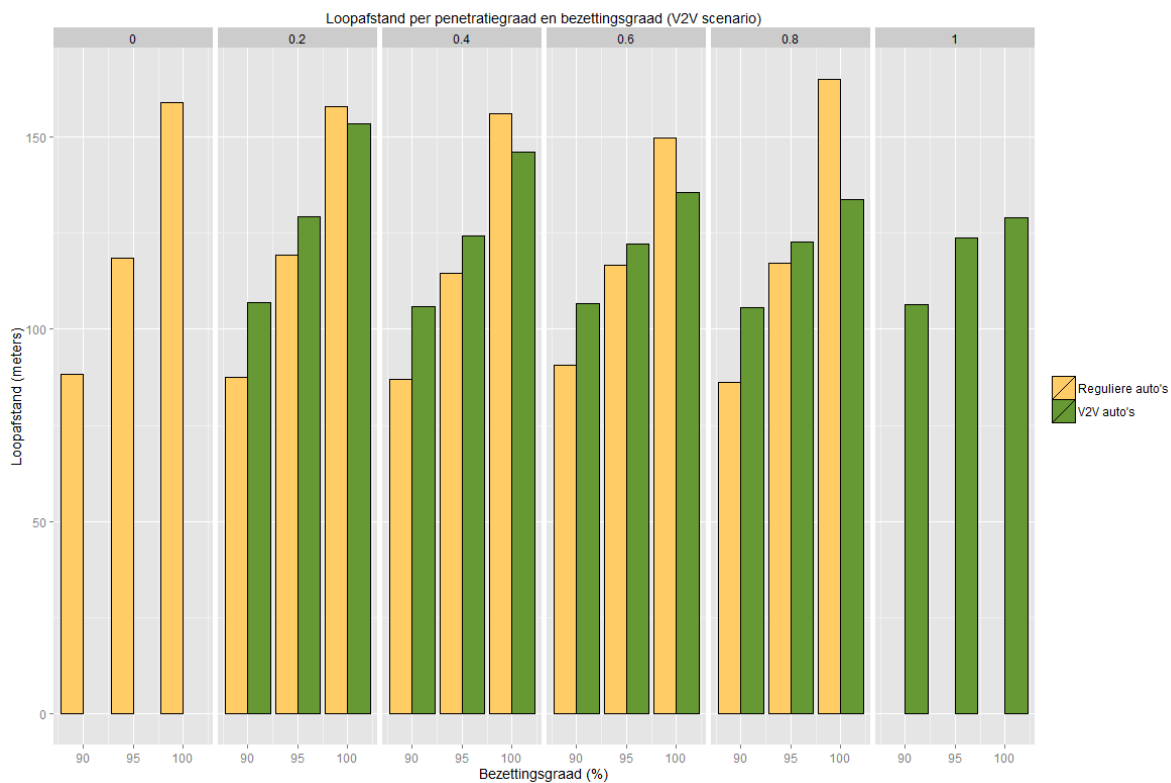
Resultaten van V2V-voertuigen

In tegenstelling tot de verwachtingen presteren de V2V-auto's onder veel omstandigheden slechter in het vinden van een parkeerplaats dan gewone auto's, voor zowel zoektijd, als wel afstand tussen de parkeerplaats en de eindbestemming. Alleen bij de experimentele opzet waarbij de initiële bezettingsgraad 100% bedraagt, presteren de V2V-voertuigen beter als het gaat om zoektijd en loopafstand. Echter, de prestatie verslechterd zodra de penetratiegraad hoger of gelijk



Figuur 4. Zoektijd voor reguliere voertuigen en V2V voertuigen, voor verschillende bezettingsgraden en penetratiegraden, voor V2V scenario.

aan 60% is (zie Figuur 4). Wanneer veel voertuigen zijn uitgerust met de mogelijkheid om te communiceren wordt het competitie-effect groter dan het voordeel dat ontstaat dat veel voertuigen informatie kunnen uitwisselen. De zoektijd voor reguliere voertuigen blijft stabiel ongeacht penetratiegraad, afgezien van de situatie waarbij 80% van de voertuigen kunnen communiceren.



Figuur 5. Loopafstand voor reguliere voertuigen en V2V voertuigen, voor verschillende bezettingsgraden en penetratiegraden, voor V2V scenario.

In tegenstelling tot de zoektijd varieert de prestatie van V2V-voertuigen met betrekking tot loopafstand meer bij verschillende bezettingsgraden (zie Figuur 5). Bij 90% bezettingsgraad is de loopafstand gemiddeld 20% groter dan de loopafstand voor reguliere voertuigen, ongeacht de penetratiegraad. Bij 95% bezettingsgraad benadert de loopafstand de prestatie van de basis situatie bij een stijgende penetratiegraad. De prestatie van V2V-voertuigen is alleen beter in de situatie met 100% bezettingsgraad. In dat geval stijgt de prestatie voor elke stijging in de penetratiegraad, met een uiteindelijke daling van de loopafstand van 19% in vergelijking met de basis situatie.

Resultaten van het gehele systeem

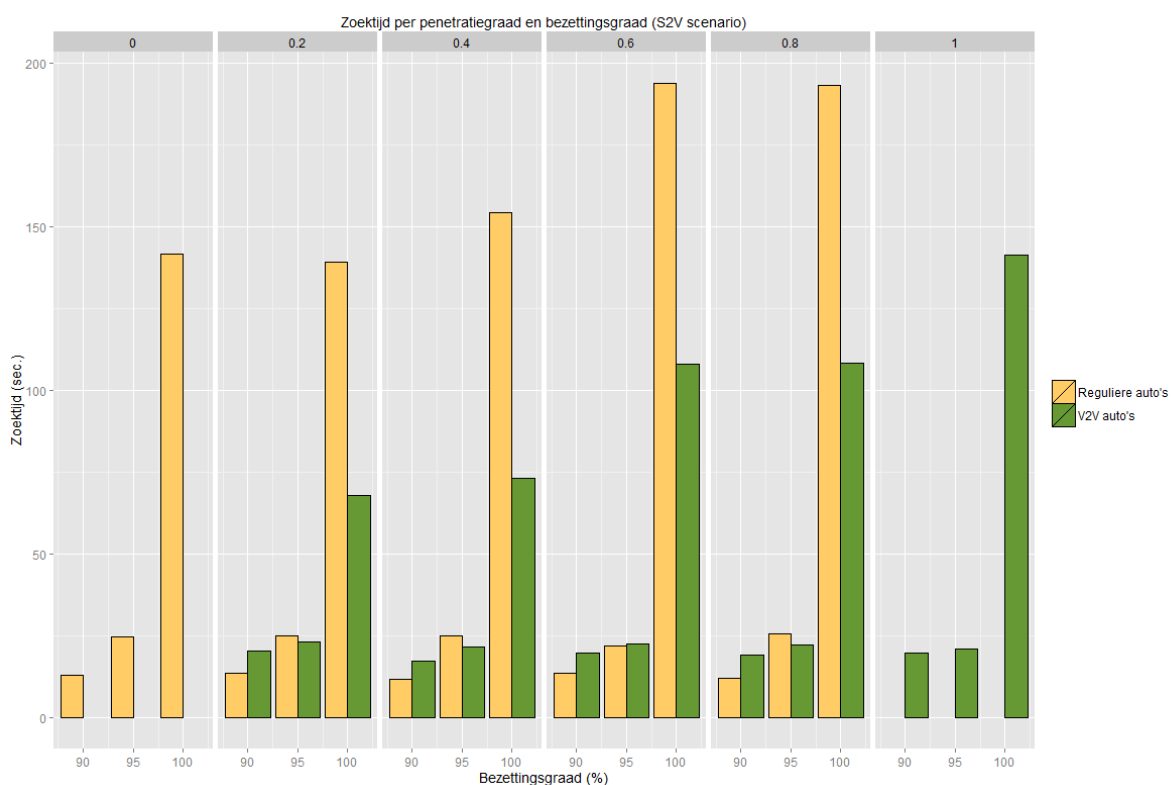
De resultaten van het gehele systeem, waarbij alle voertuigen op zoek naar een parkeerplaats ongeacht het type worden meegenomen, worden gemeten aan de hand van de algehele tijd die wordt besteed. Deze tijd is de combinatie van zoektijd en de tijd die nodig is om van de auto naar de bestemming te lopen en weer terug naar de auto. Gezien de kleine verschillen in zoektijd tussen de V2V-voertuigen en de reguliere voertuigen is deze tijd grotendeels afhankelijk van de prestatie met betrekking tot de loopafstand. Het is daarom niet verbazingwekkend dat de systeemprestatie slechter is bij een bezettingsgraad van 90%, min of meer gelijk bij een bezettingsgraad van 95% en beter voor een bezettingsgraad van 100% (zie Figuur 8, V2V-scenario). Waarbij vergeleken wordt met de prestatie van het systeem waarbij er geen V2V-

communicatie mogelijk is (de basis situatie).

4.2 Sensor-gebaseerde informatievoorziening

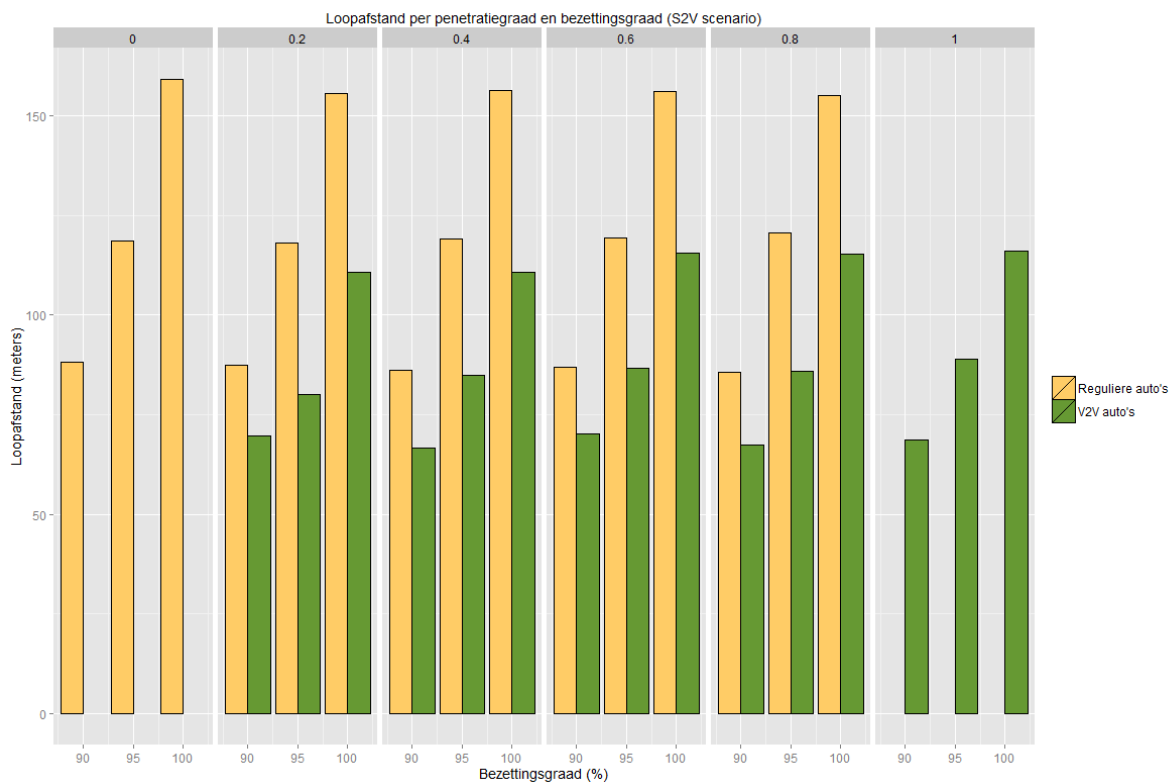
Resultaten van V2V-voertuigen

De resultaten tonen dat de prestaties veranderd zijn met invoering van sensoren. Zoektijd is vergelijkbaar met de resultaten bij subsectie 4.1 voor bezettingsgraden van 90% en 95%. Echter, de zoektijd daalt licht voor alle experimenten met 100% initiële bezettingsgraad, dus ongeacht de penetratiegraad (zie figuur 6). Dit positieve effect wordt echter kleiner naar mate de penetratiegraad toeneemt en is nagenoeg verdwenen bij een penetratiegraad van 100%. De prestatie met betrekking tot zoektijd wordt negatief beïnvloed voor reguliere voertuigen bij penetratiegraden van 40% tot 80%.



Figuur 6. Zoektijd voor reguliere voertuigen en V2V voertuigen, voor verschillende bezettingsgraden en penetratiegraden, voor S2V scenario.

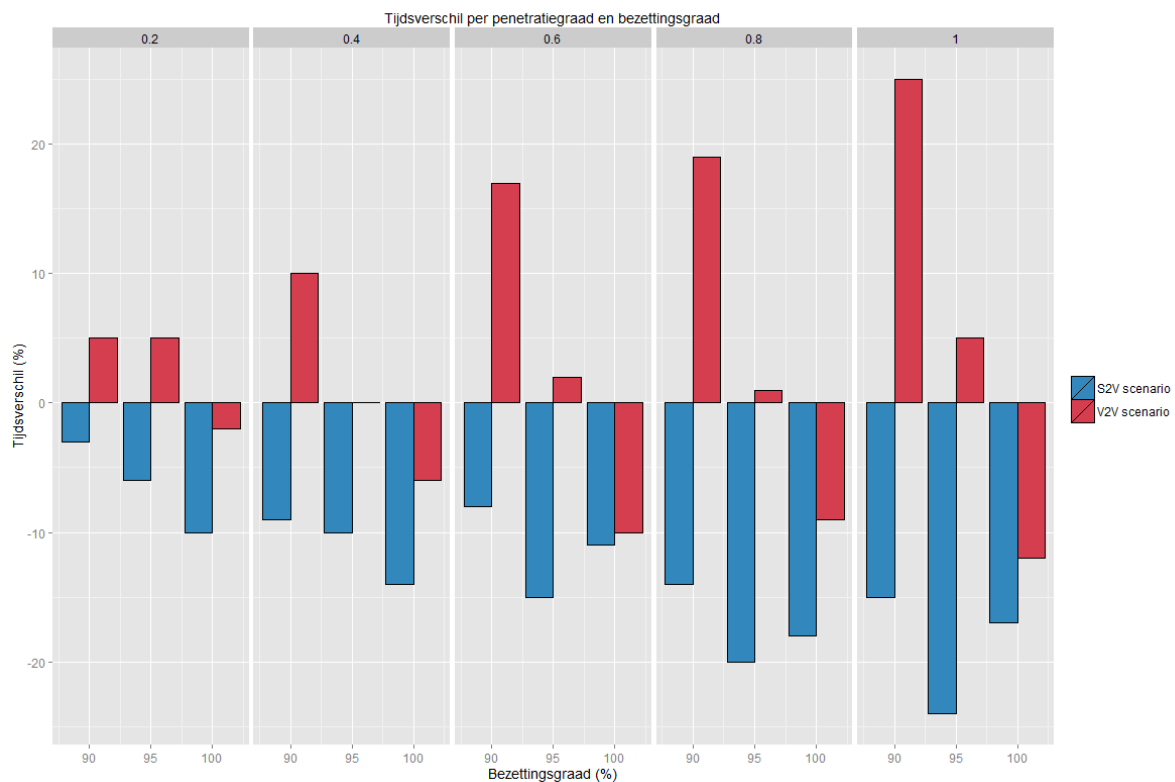
Prestaties met betrekking tot loopafstand zijn beter in elke situatie in vergelijking met reguliere voertuigen en V2V-voertuigen zonder gebruik van sensoren (figuur 7). Dit prestaties zijn onafhankelijk van de penetratiegraad. De loopafstand neemt af met gemiddeld 22% voor bezettingsgraad van 90% en met een gemiddelde van ongeveer 28% bij bezettingsgraden van 95% en 100%. De prestatie van reguliere voertuigen met betrekking tot loopafstand blijft constant bij een toenemende penetratiegraad.



Figuur 7. Loopafstand voor reguliere voertuigen en V2V voertuigen, voor verschillende bezettingsgraden en penetratiegraden, voor S2V scenario.

Resultaten van het gehele systeem

Gezien de verbetering in loopafstand voor V2V-voertuigen in het scenario met sensoren, neemt de systeemprestatie ook toe ten opzichte van de basis situatie (zie Figuur 8, S2V-scenario). Het verlies in zoektijd bij een bezettingsgraad van 90% wordt gecompenseerd door een prestatiewinst in de loopafstand. Voor de bezettingsgraden van 95% en 100% is de zoektijd gelijk of beter dan de basis situatie. Gecombineerd met de verbetering in loopafstand leidt dat tot een significante verbetering van het algehele systeem. De resultaten laten zien dat de prestatie verbeterd bij een toenemende penetratiegraad. Dit is echter alleen maar toe te wijzen aan het feit dat er meer V2V-voertuigen bijdragen aan het systeemresultaat. De enige uitzondering op deze lineaire trend doet zich voor bij een bezettingsgraad van 100% en penetratiegraden van 60% en hoger. Dit zijn de situaties waarbij een toename van het aantal V2V-voertuigen zorgt voor een toename van de zoektijd. Ditzelfde effect was zichtbaar bij het V2V-scenario zonder sensoren (zie sectie 4.1).



Figuur 8. Tijdsverschil in vergelijking tot de basis situatie, voor verschillende bezettingsgraden en penetratiegraden, voor S2V en V2V scenario.

4.3 Gevoeligheidsanalyses

Gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd om de gevoeligheid van de resultaten met betrekking tot de omzetsnelheid in verhouding tot de bezettingsgraad te onderzoeken. Een systematische en uitvoerige analyse van de effecten van verschillende bezettingsgraden op de omzetsnelheid valt buiten de focus van dit onderzoek. Echter, een kleine gevoeligheidsanalyse voor de basissituatie (geen communicatie tussen voertuigen) is uitgevoerd en deze laat zien dat de prestaties verslechteren bij toenemende omzetsnelheden (0.95 – 1.60) bij bezettingsgraden van 90% en 95%. Daarentegen verbetert de prestatie bij een toenemende omzetsnelheid bij een bezettingsgraad van 100%.

De componenten α en β hebben tijdens de simulaties een laag gewicht meegekregen. Vanwege het korte tijdsinterval (1 uur) dat gesimuleerd wordt is de temporale component minder van belang. Dit bleek ook uit de gevoeligheidsanalyses die hiervoor zijn uitgevoerd, waarbij α en β werden gevarieerd (tussen 0 – 25). De resultaten werden niet nadelig, noch positief, beïnvloed door het veranderen van de afzonderlijke componenten. Vanwege de beperkte setting van de simulatie kunnen de componenten h en t eventueel ook weggelaten worden, echter is dit niet wenselijk in verband met voortgaand onderzoek waarbij het mogelijk is dat de simulatieduur verlengd wordt.

De sterke stijging van zoektijd tussen bezettingsgraden van 95% en 100%, zoals deze waarneembaar is voor beide scenario's, benadrukte de noodzaak van extra experimenten waarbij de bezettingsgraad werd gevarieerd tussen 95% en 100%. De resultaten hiervan laten zien dat zoektijd een exponentieel verloop heeft, de zoektijd neemt sterk toe bij een toenemende bezettingsgraad. De relatie tussen loopafstand en bezettingsgraad volgt een lineair verband, oftewel een toenemende bezettingsgraad zorgt voor een lineaire stijging van de loopafstand voor de automobilist.

Daarnaast hebben we een kleine gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar maximale zoektijd met een extreme situatie waarbij 100% van de parkeerplaatsen initieel bezet is. Dit gaf aan dat bij een maximale zoektijd van 5 minuten het aantal auto's dat geen parkeerplaats kon vinden gemiddeld steeg van ongeveer 5% (bij 10 minuten) naar 20%. Een verlengde maximum zoektijd van 15 minuten deed het aantal dalen naar gemiddeld 2% van de automobilisten die geen plek hebben kunnen vinden. Voor de overige initiële bezettingsgraden, 90% en 95%, bleef het aantal voertuigen dat geen plek kon vinden binnen 10 minuten onder de 0.1%.

5. Conclusies en vervolgonderzoek

In dit artikel hebben we de effecten van bottom-up informatievoorziening op de parkeerdynamiek in de stad onderzocht. De verspreiding en het gebruik van informatie over individuele straatparkeerplaatsen kan theoretisch voor een vermindering van het zoekverkeer zorgen, omdat automobilisten die over meer informatie beschikken gemakkelijker een vrije parkeerplaats kunnen vinden. In tegenstelling tot de verwachtingen laten de simulatieresultaten zien dat de zoektijd verslechterd ten opzichte van een situatie met alleen reguliere voertuigen. Alleen in de situatie met een bezettingsgraad van 100% is er een verbetering in zoektijd waar te nemen. Dit geldt voor zowel de situatie met V2V-auto's en voor de situatie waarbij gebruik wordt gemaakt van parkeerplaatsen met sensoren. De grootste meetbare voordelen van het gebruik van informatie over parkeerplaatsen zijn terug te vinden in loopafstand. In het scenario zonder sensoren is dit alleen merkbaar in de situatie met een 100% initiële bezettingsgraad. In de setting waarbij parkeerplaatsen worden uitgerust met sensoren neemt de loopafstand af onder alle omstandigheden, dus ongeacht penetratie- en bezettingsgraad. Het tijdsvoordeel dat behaald wordt door de kortere loopafstand resulteert in een dubbele winst. Immers, deze afstand dient afgelegd te worden op weg naar de bestemming, maar ook weer bij beëindiging van de activiteit en het terugkeren naar de auto. De sensor-technologie kan op deze wijze toch leiden tot een daling van de totale reistijd van deur-tot-deur voor een automobilist, maar deze komt dus niet of nauwelijks tot stand door een kortere zoektijd.

De resultaten van de simulaties moeten uiteraard in context worden geplaatst. Ze hebben betrekking op een betrekkelijk eenvoudige situatie, waarbij de vraag naar parkeren (de bestemmingen) homogeen zijn verspreid over de ruimte. Het is niet bij voorbaat uitgesloten dat er wel degelijk ook een vermindering van de zoektijd optreedt indien de parkeervraag minder homogeen is verspreid over de ruimte, zoals typisch het geval is in centrumgebieden of bij grote attracties. De parkeerdruk is dan immers veel sterker geconcentreerd dan in de simulaties.

Een tweede kanttekening bij de resultaten betreft het feit dat de besproken systemen voor het verzamelen en verspreiden van informatie geen mogelijkheid bieden tot het reserveren van een parkeerplaats. Dit betekent dat het mogelijk is dat automobilisten, bij het bereiken van de aangeraden parkeerplaats, een reeds bezette parkeerplaats aantreffen, hetgeen mede het beperkte effect op de zoektijd kan verklaren. Er zijn twee mogelijkheden om dit probleem te ondervangen of te minimaliseren: (1) het introduceren van een reserveringssysteem; en (2) het verstrekken van informatie op een hoger aggregatie niveau. Een reserveringssysteem kan de kwestie van bezette plaatsen voor V2V-auto's voorkomen, doordat het concurrentie tussen V2V-voertuigen minimaliseert. Echter, het is lastig om te voorkomen dat de parkeerplaats ondertussen wordt ingenomen door een reguliere auto of door een V2V-automobilist die bewust ervoor kiest om niet te parkeren op de voor hem of haar aangeraden parkeerplaats. Daarnaast reduceert een reserveringssysteem de effectieve parkeercapaciteit, aangezien plaatsen langer vrij gehouden dienen te worden. De tweede oplossing, geaggregeerde data, houdt in dat V2V-auto's de informatie over individuele parkeerplaatsen aggregeert op bijvoorbeeld straatniveau. Dit maakt het mogelijk om een betere inschatting te maken van de kans op het vinden van een vrije parkeerplaats bij het daadwerkelijk arriveren in de betreffende straat, op basis van het totaal

aantal vrije plekken in de straat. Daarnaast zou dit bij gebruik van sensoren kunnen leiden tot een lager aantal sensoren dan noodzakelijk is voor een goede werking van het systeem. Immers, als er met geaggregeerde data gewerkt wordt kan er een schatting gemaakt worden op basis van de ratio van parkeerplaatsen die uitgerust zijn met een sensor.

Ondanks deze kanttekeningen, kunnen de bevindingen van het onderzoek in onze ogen niet worden genegeerd bij de besluitvorming over de implementatie van met name een sensor-systeem in de praktijk. De simulatie resultaten laten zien dat niet op voorhand moet worden aangenomen dat de maatschappelijke baten opwegen tegen de kosten van het installeren van sensoren in straatparkeerplaatsen. De baten van een sensor-systeem zullen van situatie tot situatie verschillen. In situaties die vergelijkbaar zijn met de simulatie, zullen de baten voor een groot deel moeten komen uit de afname van de loopafstand. In andere situaties zou wel degelijk een daling kunnen optreden in de zoektijd, waardoor ook afgeleide baten kunnen optreden in termen van vermindering van luchtvervuiling, geluidsoverlast, verkeersonveiligheid of congestie. Er dient echter rekening gehouden te worden met de mogelijkheid dat de reductie in totale reistijd, voornamelijk veroorzaakt door de kortere loopafstand, de relatieve aantrekkelijkheid van autogebruik verhoogt en de reisweerstand kan verlagen. Wat vervolgens leidt tot een verhoging van de parkeerdruk door de veranderende vraag.

Verder zouden automobilisten ook waarde kunnen hechten aan de vermindering van de inherente onzekerheid die het vinden van een parkeerplaats normaal gesproken met zich meebrengt. Tot slot zouden de maatschappelijke baten van een V2V of sensor-systeem ook kunnen worden gevonden in het vermijden van dure investeringen in gebouwde parkeervoorzieningen, hoewel er in dat geval weer vaak sprake zal zijn van langere zoektijden en langere loopafstanden naar de uiteindelijke bestemming.

Tezamen genomen zouden bottom-up informatie voorzieningen dus wel degelijk maatschappelijke baten kunnen hebben. De mate waarin dit het geval is vraagt om additionele analyses in een simulatie-setting, waarbij bijvoorbeeld wordt geëxperimenteerd met een minder homogene spreiding van de parkeervraag, een reserveringssysteem, of het verstrekken van informatie op een hoger aggregatieniveau. Ook lokale overheden zouden hun voordeel kunnen doen met dergelijke simulaties, door vóór de beslissing over de installatie van een sensor-systeem de mogelijke maatschappelijke baten in beeld te brengen. Het hier beschreven parkeermodel en bijbehorende simulatie-methode bieden daarvoor een uitstekende basis.

Noot

Dit artikel is gebaseerd op een eerdere versie die gepresenteerd is op de *Conference on Agent-Based Modeling in Transportation Planning and Operations* te Blacksburg, Virginia (V.S.) en is verschenen in de proceedings van deze conferentie.

De auteurs willen de twee anonieme reviewers bedanken voor hun constructieve commentaar en suggesties op een eerdere versie van dit artikel.

Referenties

Anon (n.d.) "LA Express Park," [online] Available from: <http://www.laexpresspark.org/> (Accessed 9 April 2013a).

Anon (n.d.) "Park.it SF Parking made easy," [online] Available from: <http://park.it> (Accessed 9 April 2013b).

Anon (n.d.) "Streetline: Parker Mobile," [online] Available from: <http://www.streetline.com/find-parking/parker-mobile/> (Accessed 9 April 2013c).

Arnott, R and Inci, E (2006) "An integrated model of downtown parking and traffic congestion," *Journal of Urban Economics*, 60(3), pp. 418-442, [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094119006000386> (Accessed 11 March 2011).

Benenson, I, Martens, K and Birfir, S (2008) "PARKAGENT: An agent-based model of parking in the city," *Computers, Environment and Urban Systems*, Elsevier Ltd, 32(6), pp. 431-439, [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971508000689> (Accessed 21 February 2011).

Benenson, Itzhak and Martens, Karel (2008) "From modeling parking search to establishing urban parking policy," *Zeitschrift Künstliche Intelligenz*, 3(08), pp. 8-13, [online] Available from: http://www.worldparkingsymposium.ca/parking-library/download/73/00000073_d090014ct.pdf (Accessed 21 April 2011).

Boehlé, J.L., Rothkrantz, LJM and Wezel, M. van (2008) *CBPRS: A City Based Parking and Routing System, Research Paper*, [online] Available from: <http://econpapers.repec.org/RePEc:dgr:eureri:1765012467> (Accessed 2 May 2011).

Caliskan, Murat, Graupner, Daniel and Mauve, Martin (2006) "Decentralized discovery of free parking places," *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks - VANET '06*, New York, New York, USA, ACM Press, p. 30, [online] Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1161064.1161070>.

D'Acierno, L, Gallo, M and Montella, B (2006) "Optimisation models for the urban parking pricing problem," *Transport Policy*, 13(1), pp. 34-48, [online] Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.08.001> (Accessed 8 September 2011).

Das, Shirshanka, Nandan, Alok and Pau, Giovanni (2004) "SPAWN," In *Proceedings of the first ACM workshop on Vehicular ad hoc networks - VANET '04*, New York, New York, USA, ACM Press, p. 93, [online] Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1023875.1023893> (Accessed 3 July 2013).

Delot, Thierry, Cenerario, Nicolas, Ilarri, Sergio and Lecomte, Sylvain (2009) "A cooperative reservation protocol for parking spaces in vehicular ad hoc networks," In *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Technology, Application & Systems - Mobility '09*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 1-8, [online] Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1710035.1710065> (Accessed 25 October 2011).

Demmel, Sébastien, Lambert, Alain, Gruyer, Dominique, Rakotonirainy, Andry and Monacelli, Eric (2012) "Empirical IEEE 802.11 p performance evaluation on test tracks," In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*, pp. 837-842.

Dieussaert, K., Aerts, K., Steenberghen, T., Maerivoet, Sven and Spitaels, K. (2009) "Sustapark: an agent-based model for simulating parking search," In *Proc. 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, [online] Available from: <http://www.maerivoet.org/website/phdresearch/publications/resources/saabmfsp.pdf> (Accessed 25 February 2012).

ElBatt, Tamer, Goel, Siddhartha K, Holland, Gavin, Krishnan, Hariharan, and Parikh, Jayendra (2006) "Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications," In *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp. 1-9.

Gallo, Mariano, D'Acierno, Luca and Montella, Bruno (2011) "A multilayer model to simulate cruising for parking in urban areas," *Transport Policy*, Elsevier, pp. 1-10, [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967070X11000217> (Accessed 11 March 2011).

Leontiadis, Ilias and Mascolo, Cecilia (2007) "Opportunistic spatio-temporal dissemination system for vehicular networks," In *Proceedings of the 1st international MobiSys workshop on Mobile opportunistic networking*, pp. 39-46.

Levy, Nadav, Martens, Karel and Benenson, Itzhak (2012) "Exploring cruising using agent-based and analytical models of parking," *Transportmetrica*, Taylor & Francis, (ahead-of-print), pp. 1-25.

Li, Zhi-Chun, Huang, Hai-Jun and Lam, William H K (2012) "Modelling heterogeneous drivers' responses to route guidance and parking information systems in stochastic and time-dependent networks," *Transportmetrica*, Taylor & Francis, 8(2), pp. 105-129.

Liu, Nianbo, Liu, Ming, Cao, Jiannong, Chen, Guihai and Lou, Wei (2010) "When Transportation Meets Communication: V2P over VANETs," In *2010 IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems*, IEEE, pp. 567-576, [online] Available from: http://pubget.com/paper/pgtmp_f8350a719be459a04fb75db351808ae7/When_Transportation_Meets_Communication_V2P_over_VANETs (Accessed 23 May 2013).

Martens, Karel, Benenson, Itzhak and Levy, Nadav (2010) "The Dilemma of On-Street Parking Policy: Exploring Cruising for Parking Using an Agent-Based Model," In Jiang, B. and Yao, X. (eds.), *Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics*, GeoJournal Library, Springer Netherlands, pp. 121-138, [online] Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-8572-6_7.

Van Ommeren, J., Wentink, Derk and Rietveld, Piet (2010) "Empirical Evidence on Cruising for Parking," *Tinbergen Institute Discussion Papers*, Tinbergen Institute, [online] Available from: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1593001 (Accessed 21 April 2011).

Van Ommeren, Jos N., Wentink, Derk and Rietveld, Piet (2012) "Empirical evidence on cruising for parking," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(1), pp. 123-130, [online] Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856411001443> (Accessed 30 April 2014).

Prinz, Vivian, Eigner, Robert and Woerndl, Wolfgang (2009) "Cars communicating over publish/subscribe in a peer-to-peer vehicular network," In *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, pp. 431-436.

Shoup, D.C. (2005) *The high cost of free parking*, Planners Press, American Planning Association, [online] Available from: <http://www.connectnorwalk.com/wp-content/uploads/The-High-Cost-of-Free-Parking.pdf> (Accessed 8 September 2011).

Szczurek, Piotr, Xu, B, Lin, J and Wolfson, Ouri (2010) "Spatio-temporal information ranking in vanet applications," *Intl. Journal of Next-Generation Computing*, 1(1), [online] Available from: http://www.cs.uic.edu/~boxu/mp2p/4_Szczurek_14_June.pdf (Accessed 28 November 2012).

Szczurek, Piotr, Xu, Bo, Wolfson, Ouri, Lin, Jie and Rische, Naphtali (2010) "Learning the relevance of parking information in VANETs," In *Proceedings of the seventh ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking - VANET '10*, New York, New York, USA, ACM Press, p. 81, [online] Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1860058.1860074> (Accessed 25 October 2011).

Tasseron, G and Schut, MC (2009) "SOTRIP: a self organizing protocol for traffic information," In *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, ACM, pp. 1152-1156, [online] Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1582632> (Accessed 28 April 2011).

Vaghela, V B and Shah, D J (2011) "Vehicular parking space discovery with agent approach," In *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology*, pp. 613-617.

Van der Waerden, P, Timmermans, H and Borgers, A (2002) "PAMELA: Parking analysis model for predicting effects in local areas," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Trans Res Board, 1781, pp. 10-18.

Van der Waerden, Peter, Timmermans, Harry and Barzeele, Peter (2011) "Car Drivers' Preferences Regarding Location and Contents of Parking Guidance Systems," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Trans Res Board, 2245(1), pp. 63-69.

Wischhof, L, Ebner, A and Rohling, H (2005) "Information dissemination in self-organizing intervehicle networks," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 6(1), pp. 90-101.