



In de Witte de Withstraat zijn veel winkels, galerieën en horecagelegenheden die allemaal bevoorraad dienen te worden, wat veel logistieke handelingen oplevert in de straat.

Een simulatiestudie naar verbetering van de congestieproblematiek in de Witte de Withstraat (Rotterdam)

Ron van Duin KennisDC Logistiek Zuid Holland, Hogeschool Rotterdam/
Technische Universiteit Delft

Eva Rijkers Faculteit Techniek, Bestuur & Management,
Technische Universiteit Delft

Ewoud Moolenburgh KennisDC Logistiek Zuid Holland, Hogeschool Rotterdam

SAMENVATTING

De Witte de Withstraat is een belangrijke straat in Rotterdam. Er zijn veel winkels, galerieën en horecagelegenheden gevestigd. Deze ondernemers dienen allemaal bevoorraad te worden, wat veel logistieke handelingen oplevert in de straat. Naast de grote logistieke stroom rijdt er veel regulier verkeer door de straat. De combinatie van deze twee verkeersstromen zorgt vaak voor filevorming en vertraging. Naar aanleiding van een onderzoek van de Hogeschool Rotterdam is het vermoeden versterkt dat de filevorming verband houdt met de enige aanwezige los-/laadplek in de straat.

In dit artikel wordt de relatie tussen de enige los-/laadplek en de filevorming in de Witte de Withstraat op kwantitatieve wijze onderzocht. De methode die hiervoor wordt gebruikt, is discrete simulatie met modelvorming in het softwareprogramma Simio. Het huidige systeem van de straat wordt in dit programma gesimuleerd. Aan de hand van vier experimenten worden verscheidene scenario's uitgevoerd om de relatie tussen de los-/laadplek en de filevorming nader te onderzoeken.

Er is geëxperimenteerd met het aantal los-/laadplekken, de locaties ervan in de straat en de snelheid van het verkeer. De eerste conclusie die hieruit voort is gekomen, is dat de toevoeging van los-/laadplekken een zeer positief effect heeft op de doorrijdtijden van het verkeer in de straat. Met drie los-/laadplekken in de straat neemt de doorrijdtijd van regulier verkeer met bijna 40% af en kan ruim de helft van de leveranciers op de officiële plek laden/lossen, in tegenstelling tot maar 18% bij één aanwezige los-/laadplek. De locatie van de plekken in de straat houdt daarentegen nauwelijks verband met de vertraging. Daarnaast heeft een verlaagde toegestane snelheid in de straat in eerste instantie een negatief effect op de doorrijdtijden van het verkeer. In combinatie met de aanleg van meerdere los-/laadplekken wordt hier wel een lagere winst op behaald.

INLEIDING

Het KennisDC Logistiek-onderzoek naar duurzame distributie oplossingen in binnensteden. Deze onderzoeksambitie valt onder de verantwoordelijkheid van het lectoraat Haven- en stadslogistiek. Na dataverzameling met studenten en docenten van de opleiding Logistiek Management (Hogeschool Rotterdam) voor verschillende winkelstraten in Rotterdam, liggen er mogelijkheden om de effecten van 'slimme' laad/losplekken te bestuderen. Deze resultaten kunnen worden gebruikt voor advies aan de gemeente waar deze laad- en losplaatsen in de winkelstraten opgesteld kunnen worden. Het ontwikkelde model kan makkelijk worden gebruikt voor andere straten.

Introductie en motivatie

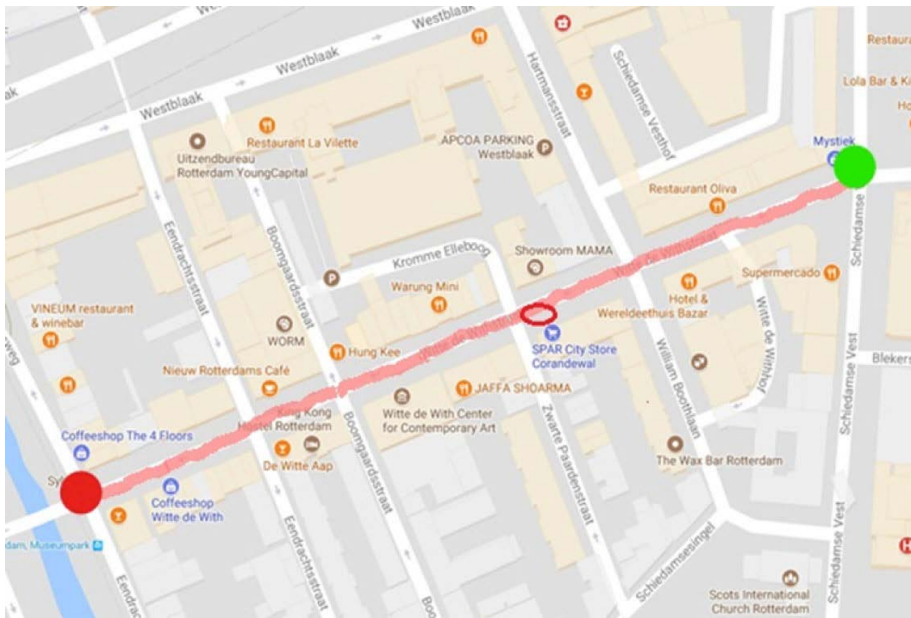
De Witte de Withstraat in Rotterdam vormt een knelpunt voor het verkeer en de logistiek in de stad. De straat heeft veel te maken met congestie, wat leidt tot gevaarlijke situaties en hinder voor de omgeving (Akkerman, Amgar, De Groot, Koenraadt & Verkade, 2016). De Gemeente Rotterdam wil de leefbaarheid van de stad verbeteren en heeft sinds 2008 ingezet op Citylounge als invulling van de binnenstadsvisie (Gemeente Rotterdam, 2014). In dit plan wordt onder andere ingezet op een goede afwikkeling van autoverkeer en kwaliteit van inrichting van de openbare ruimte. De Gemeente Rotterdam is geïnteresseerd in het verkrijgen van inzicht in de werkelijke problematiek van de Witte de Withstraat. Pas wanneer inzicht verkregen is in welke factoren de knelpunten veroorzaken, kan gezocht worden naar passende oplossingen.

De congestie ontstaat door de samenkomst van het verkeer en de logistieke stroom in de straat. Het is echter niet precies duidelijk door welke aanwijsbare factoren de problematiek wordt veroorzaakt. De Hogeschool van Rotterdam heeft onderzoek gedaan naar de congestie in de Witte de Withstraat. Er is geobserveerd dat er slechts één los-/laadplek is in de straat, waardoor de helft van de keren de vracht op straat wordt gelost en maar 16-18% van de keren de los-/laadplek kan worden gebruikt (Akkerman et al., 2016). Hierbij dient opgemerkt te worden dat beleving aan de achterzijde van de retailers, via de Korte Ellenboog, in dit onderzoek niet is meegenomen. Leveranciers die op straat laden en lossen vergroten op deze manier de kans op congestie. Vermoedelijk is de enige los-/laadplek dus

een grote factor in het ontstaan van de fileproblematiek in de straat. Wanneer leveranciers geen ruimte hebben om te laden of te lossen, heeft dit een negatief effect op veiligheid, milieu en overig verkeer (Aiura & Taniguchi, 2006). Deze negatieve effecten tonen het belang van beschikbare ruimte om te laden of te lossen in steden. Dit belang krijgt slechts weinig aandacht (McLeod & Cherrett, 2011). Effectief bestuurlijk beleid is noodzakelijk om de leefbaarheid van de stad te waarborgen en de negatieve effecten van stadslogistiek te reduceren (Oliveira & Dias Guerra, 2014). Er is een kwantitatief onderzoek nodig om te kunnen onderbouwen dat de enige los-/laadplek daadwerkelijk voor congestie zorgt in de Witte de Withstraat.



Sfeerimpressie van de Witte de Withstraat, Rotterdam.



Kaart van de Witte de Withstraat; rijrichting van groen naar rood, los-/laadplek bij rode cirkel

27

Om inzicht te verkrijgen in de relatie tussen de enige los-/laadplek en de congestie in de straat en om een gedegen advies te kunnen geven over de uitbreiding van los-/laadplekken, is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

"Wat is de relatie tussen de enige los-/laadplek en de congestie in de Witte de Withstraat en welk advies met betrekking tot uitbreiding van het aantal los-/laad-plekken hoort hierbij?"

In dit onderzoek is tijd een essentiële factor aangezien aankomsttijden en los-/laadtijden gesimuleerd dienen te worden. Derhalve zal gebruik worden gemaakt van discrete simulatie. Met discrete simulatie is het mogelijk om een vereenvoudigde weergave te maken van de werkelijkheid om het gedrag van het systeem te evalueren. Daarnaast kan het gebruikt worden om te experimenteren met verschillende beleidsopties (Korn, 1998). Discrete simulatie is een efficiënte methode voor operationele logistieke en transportsystemen (Tako & Robinson, 2012). Simio is een softwareprogramma wat gebruikt kan worden bij dynamische, discrete, stochastische simulaties. Simio maakt gebruik van simpele grafische processtromen en is uitermate geschikt om eigen modellen te maken (Kelton et al., 2014).

Het onderzoek zal op iteratieve wijze worden uitgevoerd volgens een modelleercyclus van Sargent (2011). Ten eerste moet van het huidige systeem van de Witte de Withstraat een conceptueel model gemaakt worden. Dit model toont de wiskundige en logische representatie van het oorspronkelijke systeem. Wanneer dit model gevalideerd is, kan de implementatie in Simio plaatsvinden. Tussen deze twee modellen vindt verificatie plaats om te verzekeren dat de juiste vertaling gemaakt is. Vervolgens wordt operationele validatie uitgevoerd om de nauwkeurigheid van de resultaten te waarborgen, of het model inderdaad het gedrag vertoont wat verwacht wordt. Voor de validatie en verificatie van dit model zullen verschillende technieken gebruikt worden, namelijk: grafische animatie van resultaten, variëren met inputwaarden en vergelijking van systeemgedrag tussen model en werkelijke systeem. In het uiteindelijke geverifieerde en gevalideerde model worden meerdere experimenten uitgevoerd om een antwoord te kunnen vormen op de eerder genoemde onderzoeksvraag.

Conceptualisatie van de Witte de Withstraat

Robinson (2008) noemt de conceptualisatie het belangrijkste en tegelijkertijd het moeilijkste onderdeel van de gehele simulatiestudie. Een adequate ontwikkeling van een conceptueel model is noodzakelijk, aangezien het conceptueel model de brug vormt tussen het werkelijke systeem en het uiteindelijke model. Daarmee geeft de conceptualisatie duidelijkheid over de kritische factoren en processen in het systeem (Pace, 2000). Vervolgens worden de stappen van Robinson (2008) gevolgd om tot een conceptueel model van de probleemsituatie in de Witte de Withstraat te komen.

Het conceptueel model bestaat uit de volgende elementen:

- **De straat**

Het systeem dat gemodelleerd wordt is de volledige Witte de Withstraat. De Witte de Withstraat is een straat in het centrum van Rotterdam (Figuur 1b). De straat begint bij de kruising van de Schiedamse Vest en de Schilderstraat en loopt vervolgens in westelijke richting tot de kruising met de Eendrachtsweg. De straat is een eenrichtingsweg en er rijdt geen openbaar vervoer doorheen. Het is een drukke straat met veel regulier verkeer (auto's en fietsers). Daarnaast kent de straat een grote logistieke stroom om alle winkels en horecagelegenheden te voorzien. Het is een straat die veel bezoekers trekt. Men vindt er veel horecagelegenheden, winkels, uitgaansgelegenheden en galerieën.

- **Het verkeer**

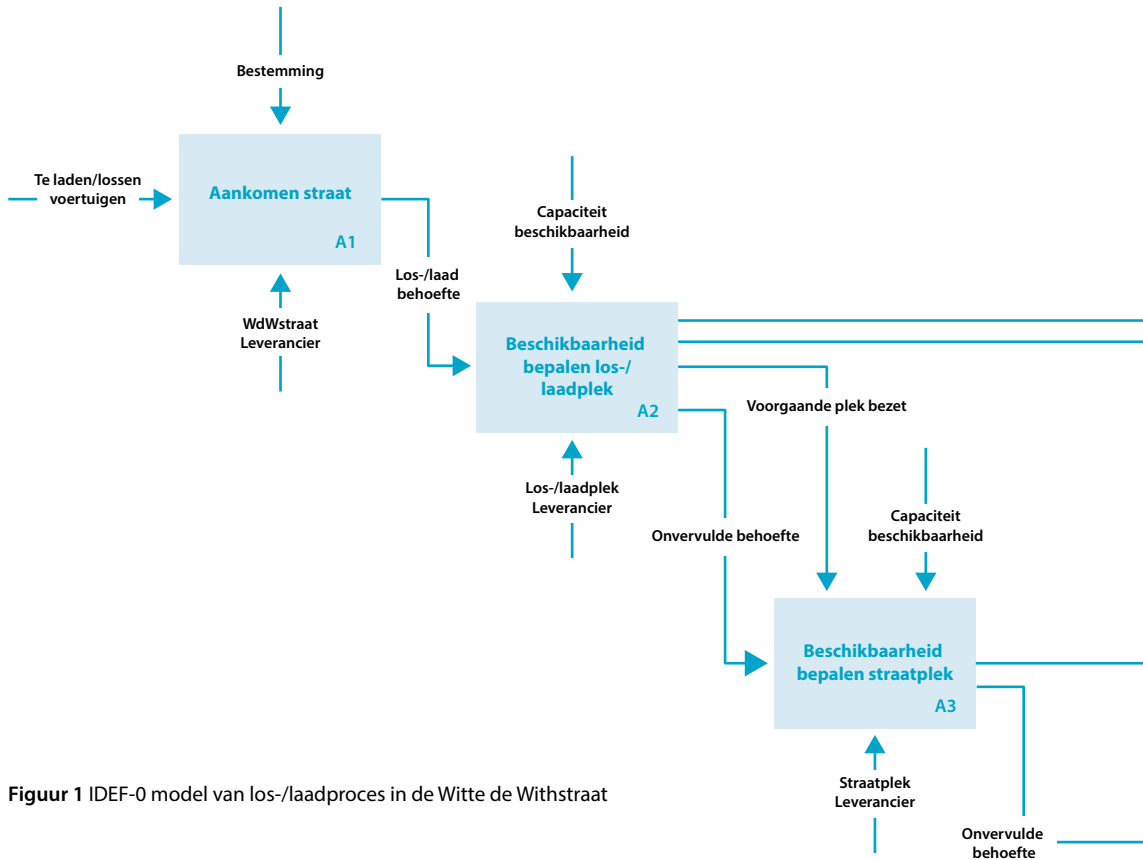
Er rijdt een grote stroom regulier verkeer door de Witte de Withstraat. Een deel van het verkeer heeft de straat zelf als bestemming en probeert ergens in de straat te parkeren. Er zijn aan beide kanten van de straat parkeerplekken te vinden. Het grootste deel van de auto's gebruikt de straat als doorgaande weg voor een andere bestemming. De straat dient voor veel verkeer als rustigere parallelweg van de Westblaak.

- **De leveranciers**

Vooraf de horecagelegenheden en winkels dienen regelmatig bevoorrad te worden. De vele verschillende ondernemers hebben ook veel verschillende leveranciers. Dit betekent dus dagelijks een grote logistieke stroom in de straat. Maar liefst 83% van de ondernemers in de Witte de Withstraat laat zijn leveringen bezorgen (Akkerman et al., 2016). Er is in de straat maar één los-/laadplek aangelegd, op ca. 2/5 (128 meter) van het begin van de straat. Alle keren dat de los-/laadplek bezet is of leveranciers de plek te ver van hun bestemming vinden, plaatsen zij hun voertuig op de stoep, een autoparkeerplaats of op de straat zelf (Akkerman et al. 2016). Deze alternatieve parkeerhandelingen werken vertragend op de doorstroom van de rest van het verkeer.

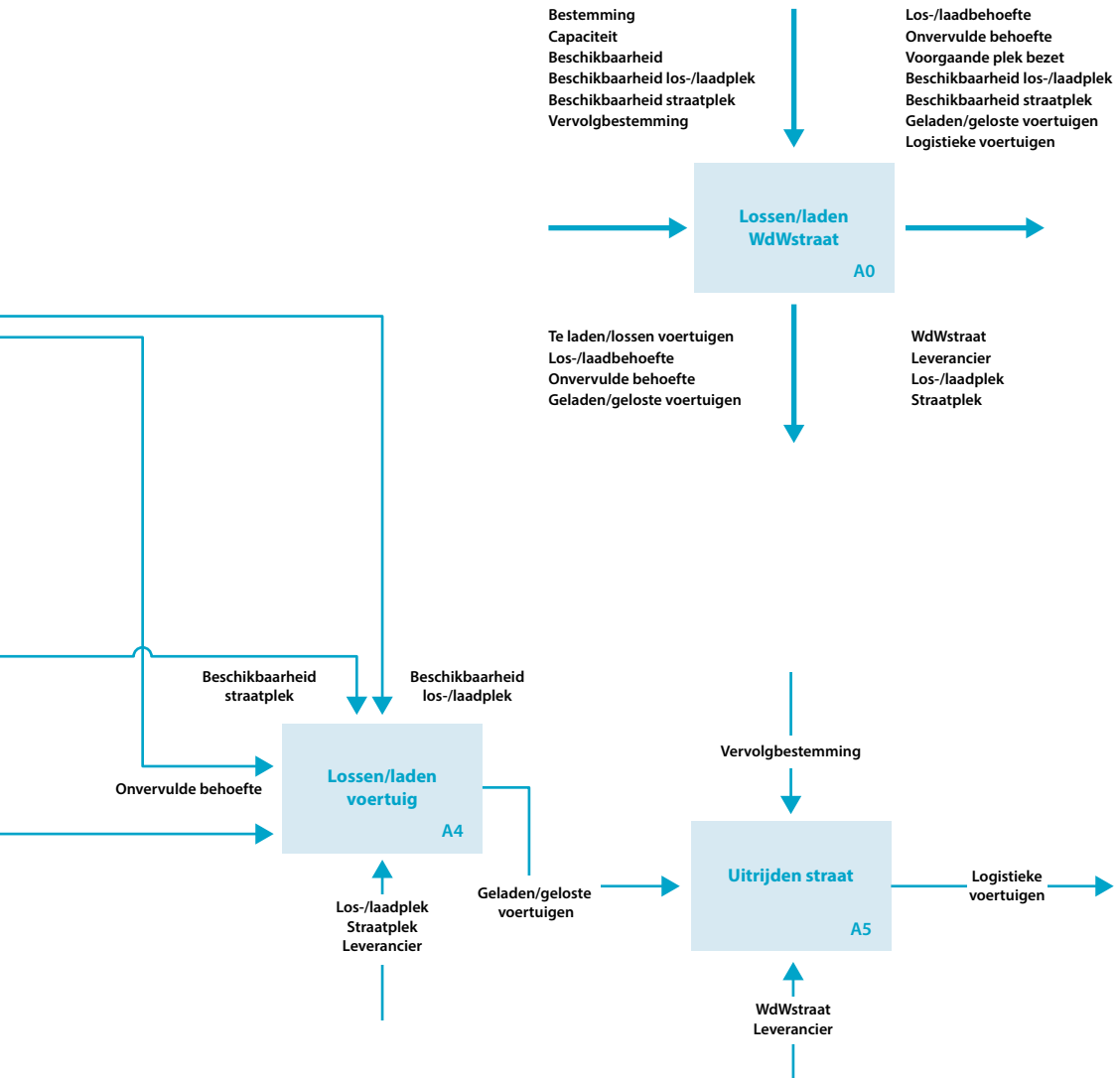
- **Het bevoorradingsproces**

Op maandagochtend is het qua verkeer het drukste moment in de Witte de Withstraat. De vele ondernemers worden opnieuw bevoorrad voor de komende week. Ook is het op maandagochtend druk met regulier verkeer, de nieuwe werkweek is begonnen. In het onderzoek van de Hogeschool Rotterdam (2016) is met observatie bevestigd dat de piek in zowel regulier verkeer als leveranciers op maandagochtend ligt. Om een degelijk advies te kunnen geven over het benodigd aantal los-/laadplekken en de locaties om filevorming te voorkomen, is een simulatie van het drukste moment in de week vereist. Daarom wordt het model gesimuleerd als een maandagochtend van 8.00 tot 11.00 uur. Een dergelijk model van de pieksituatie simuleert de maximaal te verwachten systeem-belasting (Nijhuis, 1999). Er kan verondersteld worden dat bij het oplossen van deze piek, op elk ander moment de probleemsituatie zich ook niet dusdanig voor zal doen. Het systeem is vereenvoudigd weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 IDEF-0 model van los-/laadproces in de Witte de Withstraat

Het A0-model staat rechts bovenin en representeert het gehele los-/laadproces in de Witte de Withstraat. In de rest van het model wordt het hoofdproces opgedeeld in deelprocessen. Ten eerste rijden de logistieke voertuigen de straat in (A1). De leveranciers hebben de behoefte om lading te lossen of te halen in de straat en zijn dus op zoek naar een plek om deze handelingen uit te voeren. Ze komen langs de eerste los-/laadplek A en bekijken of deze plek al dan niet beschikbaar is, dit is activiteit A2. Wanneer de plek beschikbaar is, kan de leverancier parkeren en gaan laden/lossen (A4) om vervolgens als voertuig met een vervulde behoefte de straat uit te rijden (A5). Wanneer de los-/laadplek niet beschikbaar is, zal de leverancier doorrijden naar een straatplek om de beschikbaarheid hiervan te bekijken (A3). Wanneer de straatplek ook bezet is, blijft dit proces zich bij de volgende straatplekken voordoen tot de leverancier wel een beschikbare plek heeft gevonden. Na het laden/lossen op een straatplek rijdt de leverancier met een vervulde behoefte de straat uit.



Specificatie van de Witte de Withstraat

Voor het simuleren van het huidige systeem van de Witte de Withstraat zijn datagegevens uit verscheidene bronnen gebruikt. In onderstaande tabel worden de inputvariabelen met waarden, distributies en bijbehorende bronnen weergegeven. Voor extra toelichting op het vaststellen van de waarden en distributies verwijzen wij naar Rikkers (2017).

Tabel 1 Waardes van de inputvariabelen

Inputvariabele	Waarde	Toelichting
Verkeer (regulier)		
Aantal	989 (3 uur)	Akkerman et al. (2016)
Aankomsttijden	Poissondistributie (auto's per 15 minuten) ($\lambda = 82,417$)	Akkerman et al. (2016)
Snelheid	45 km/uur	
Logistieke leveranciers		
Aantal	40 (3 uur)	Akkerman et al. (2016)
Aankomsttijden	Poissondistributie (leveringen per 15 minuten) ($\lambda = 3.33$)	Akkerman et al. (2016)
Snelheid	40 km/uur	
Lossen en laden		
Gemiddelde los-/laadtijd	Exponentiële distributie (minuten) ($\lambda = 0,05026$)	Akkerman et al. (2016)
Locatie los-/laadplek in de straat	1 op 2/5 (128 m) van begin van de straat	Google Street View (2016)
Locatie op straat lossen/laden in de straat	'Oneindig' veel mogelijkheden voorbij de los-/laadplek (192 – 320 m)	
Witte de Withstraat		
Lengte straat	Exponentiële distributie (minuten) ($\lambda = 0,05026$)	Wikipedia (2016)
Breedte rijbaan	1 op 2/5 (128 m) van begin van de straat	Google Street View (2016)

Tabel 2 Eenheden van de outputvariabelen (KPI's)

Outputvariabele	Eenheid
Gemiddelde doorrijdtijd regulier verkeer	Minuten
Gemiddelde doorrijdtijd logistiek verkeer	Minuten
Percentage gebruik los-/laadplek	%
Bezettingsgraad 'dubbel parkeren'	%
Gemiddelde los-/laadtijd	Minuten
Benodigd aantal los-/laadplekken	#
Benodigde locatie los-/laadplekken	Locatie (vakdeel)

Key Performance Indicators (KPI's)

Het systeem en zijn uitkomsten zullen moeten worden beoordeeld worden. Dit gebeurt aan de hand van zogenaamde KPI's, de indicatoren. Deze indicatoren zijn de bovengenoemde uitkomstvariabelen (Tabel 2). Voor het gehele systeem van de straat is de gemiddelde doorrijdtijd van zowel het reguliere als logistieke verkeer een belangrijke indicator. Deze indicator is essentieel voor het inzicht in de congestievorming. Tevens zijn deze waarden van groot belang voor het verkeer zelf. Verder zijn er een aantal indicatoren die iets zeggen over het gebruik van de los-/laadplek, namelijk: het percentage leveranciers dat gebruikmaakt van de los-/laadplekken en de bezettingsgraad van 'dubbel parkeren'. Met behulp van deze indicatoren wordt het nuttig gebruik van de plekken inzichtelijk gemaakt voor de gemeente. Uit het model zal tot slot het benodigd aantal los-/laadplekken en de benodigde locatie van los-/laadplekken naar voren komen. Hiermee kan een advies gevormd worden met betrekking tot de uitbreiding van het aantal los-/laadplekken. De KPI's zullen niet alleen bestudeerd worden op de gemiddelde uitkomsten, maar tevens op het bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval.

Dit onderzoek richt zich op de piekuren wat betreft verkeer in de Witte de Withstraat. Uit databronnen (Akkerman et al., 2016) blijkt dat deze drukte plaatsvindt op de maandagmorgen tussen 8.00 en 11.00 uur. Daarom worden de simulaties ook met bijbehorende variabelen tijdens deze 3 uur uitgevoerd. Aangezien 3 uur een korte run-tijd is voor een simulatie, wordt elk scenario 750 keer gerepliceerd. Er is bovenop de 3 uur een extra opwarmtijd nodig voor het model om logische waarden te verkrijgen. De straat is immers altijd in gebruik van verkeer en begint niet 'leeg' wanneer het model start met runnen (Kelton et al., 2014).

Er wordt een opwarmtijd van 30 minuten gehanteerd alvorens het model de waarden gaat meten.

Aannames

Elk model is een simplificatie van de werkelijkheid. Een model is dus abstracter dan het werkelijke systeem. Dit betekent dat overbodige details weggelaten zullen worden om de focus op andere elementen te vergroten. Op deze manier komt er meer nadruk te liggen op de elementen die voor dit model van belang zijn (Hillston, 2006). De aannames worden hieronder besproken:

- **Het model** wordt gemodelleerd als een maandagochtend van 8.00 tot 11.00 uur. Dit tijdsblok is het drukste dagdeel van de week. Het gaat om de grootte van de reguliere verkeersstroom, het aantal logistieke voertuigen en de bijbehorende los-/laadtijden. Deze metingen zijn gedaan op slechts één enkele maandagochtend in het najaar van 2016 (Akkerman et al., 2016).
- **Tijd van laden en lossen** is op dezelfde maandagochtend gemeten als de rest van de tellingen. De los-/laadtijden zijn relatief lang, dit kan te maken hebben met de drukte in de straat en/of de grootte van de leveringen. De los-/laadtijden hebben een exponentiële distributie met een $\mu = 19,9$ (minuten) (Rikkers, 2017).
- **Al het verkeer** rijdt de straat bij de kruising tussen de Schiedamse Vest en Schilderstraat binnen. Het verkeer komt onafhankelijk van elkaar het systeem in, volgens exponentieel verdeelde tussenaankomsttijden, Poisson verdeeld. In Simio is een discrete waarde nodig, dus is het afgerond naar $\mu = 0,18$ (minuten) voor regulier verkeer, $\mu = 4,5$ (minuten) voor logistiek verkeer (Rikkers, 2017).
- **De gemiddelde snelheid** van het doorgaande verkeer wordt geschat op 45 km/uur. De maximale snelheid die geldt in de straat is 50 km/uur. Er is een kruising waar voorrang verleend moet worden, er zijn zebrapaden en er zijn twee fietsersstromen in de straat. Om deze redenen wordt de gemiddelde snelheid lager geschat dan de maximaal toegestane snelheid. De snelheid van het logistieke verkeer wordt nog iets lager ingeschat, namelijk 40 km/uur. Dit komt omdat deze voertuigen groter en logger zijn, en omdat de bestuurders van deze voertuigen op zoek zullen zijn naar een geschikte plek om te laden en lossen.
- **De locaties van lossen/laden** zijn de officiële los-/laadplek en op straat. Er wordt aangenomen dat een leverancier altijd voor de los-/laadplek kiest wanneer hij/zij aan komt rijden en deze vrij is. Wanneer de plek bezet is, rijdt de leverancier door en stopt bij de eerstvolgende mogelijkheid op straat. De mogelijkheden om op straat te stoppen zijn voorbij 192 meter gelijk verdeeld over de rest van de 320 meter. Dit betekent ook dat wanneer een leverancier de los-/laadplek al voorbij is, deze niet meer terug zal rijden wanneer de plek opeens wel beschikbaar komt.

- **Passeren** van logistiek verkeer dat staat te laden/lossen kan in dit model. Wanneer de voertuigen op los-/laadlocaties geparkeerd staan, lopen de andere voertuigen geen vertraging op bij het passeren. Wanneer de los-/laadhandelingen op straat worden uitgevoerd, kunnen de andere voertuigen ze ook passeren maar met een vertraging van 10 seconden.

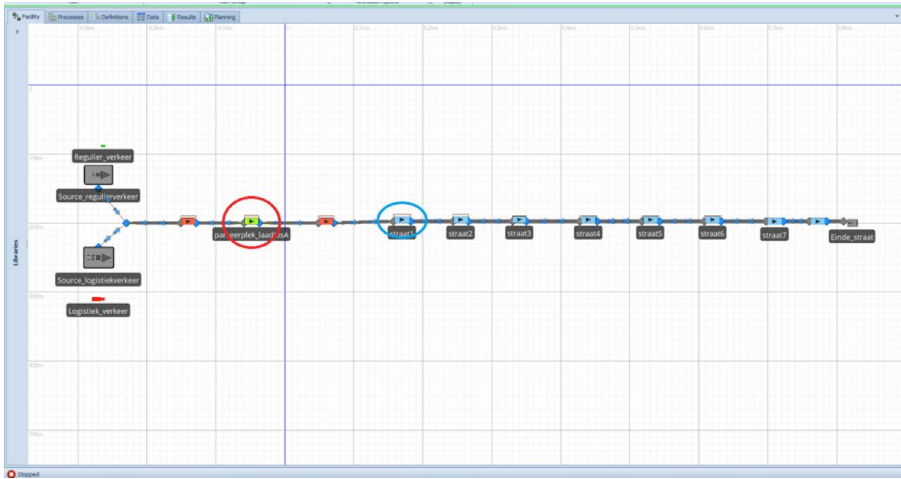
Vereenvoudigingen

Naast het nemen van aannames om het model een simplificatie van de werkelijkheid te maken, worden er ook vereenvoudigingen in het model aangebracht. De vereenvoudigingen zijn als volgt:

- De winkels en horecagelegenheden in de straat worden niet als entiteiten in het model opgenomen. De exacte bestemmingen van de leveranciers zijn dan ook buiten beschouwing gelaten in dit model. Leveranciers hebben als enige doelstelling dat zij vanaf de los-/laadplek op de eerste vrije locatie willen parkeren om te laden/lossen.
- Logistieke voertuigen parkeren altijd op de los-/laadplek indien deze beschikbaar is. Wanneer de plek bezet is, zullen de voertuigen altijd een plek op straat zoeken om even te kunnen staan.
- Elk logistiek voertuig heeft maar één bestemming in de straat en hoeft dus maar één keer te lossen/laden.
- De zijwegen worden buiten beschouwing gelaten. Al het verkeer rijdt bij de eerste kruising de Witte de Withstraat binnen.
- In werkelijkheid rijdt zo nu en dan een vuilniswagen door de straat. Deze is voor de vereenvoudiging niet in het model opgenomen. Dit is namelijk een zeer sporadische gebeurtenis.
- De stroom van regulier verkeer heeft zijn bestemming buiten de Witte de Withstraat liggen. Dit betekent dat de voertuigen de straat als doorgaande weg beschouwen en niet zullen parkeren in de straat zelf.
- Fietsers in de straat worden buiten beschouwing gelaten in dit model. Zij zijn geen onderdeel van de fileproblematiek en zijn dus niet van belang voor het onderzoek.

Het simulatiemodel Witte de Withstraat

Het verkeer in de Witte de Withstraat is gemodelleerd in Simio. Het model bestaat uit de straat met los-/laadplekken en straatplekken om op te parkeren. Door de straat rijden auto's die zich als regulier verkeer gedragen en vrachtauto's die de behoefte hebben om ergens in de straat te laden of lossen.



Figuur 2 Model van de Witte de Withstraat in Simio

36

In Figuur 2 is het simulatiemodel van de Witte de Withstraat weergegeven. De straat is gesimuleerd volgens de werkelijke lengte van 320 meter. Er zijn aan het begin van de straat drie los-/laadplekken (rode en groene servers) te zien. De twee rode servers zijn in het basecase scenario niet geactiveerd, deze worden later gebruikt bij de uitvoering van de experimenten. Alleen de groene server wordt initieel gebruikt, deze ligt op 128 meter vanaf het begin (rood omcirkeld). De los-/laadplekken worden gevolgd door acht blauwe straatplekken. De eerste straatplek ligt op 208 meter vanaf het begin (blauw omcirkeld). De volgende straatplekken liggen allemaal op een afstand van 16 meter van elkaar. Op deze manier is het mogelijk om als vrachtwagen voorbij de laatste los-/laadplek 'overall' op straat te parkeren waar nog geen andere vrachtwagen stilstaat.

Alvorens het model gebruikt kan worden voor experimenten, moet gecontroleerd worden of het model juist is gemaakt. Dit wordt gedaan door verificatie en validatie toe te passen op het model.

Verificatie van het model

Voor de verificatie is het model ten eerste in interactieve modus gevolgd om het gedrag te observeren. De outputwaardes uit deze run zijn nader bestudeerd. Daarnaast is het model onderzocht op de resultaten in het basecase scenario. Het model heeft voor die verificatie gerund over een periode van 3 uur met 750 replicaties. Er geldt hoe meer replicaties, hoe nauwkeuriger de resultaten. Het 95% betrouwbaarheidsinterval wordt nu uitgerekend als de schatter $\pm 1.96 \cdot$ standaardfout.

Het is belangrijk dat gecontroleerd wordt of de inputvariabelen de juiste uitkomsten genereren. Daarom is zowel naar de outputvariabelen uit een run in interactieve modus gekeken als naar die van het basecase scenario. Het aantal logistieke (39) en reguliere voertuigen (951) in de interactieve run komt overeen met de manier waarop deze inputvariabelen gedistribueerd zijn. In het basecase scenario liggen deze waarden gemiddeld rond de 40 en 1001. Daarnaast komt naar voren dat alle entiteiten die het systeem binnenrijden de juiste weg afleggen en uiteindelijk het systeem uitrijden (of nog in het systeem zijn op het moment van stoppen). Tevens werken alle los-/laadplekken en straatplekken volgens de verwachtingen. Het in behandeling nemen, blokkeren en doorsturen van vrachtwagens gaat bij alle parkeerplekken goed.

Bij de uitkomsten komen acceptabele bezettingsgraden naar voren, die bij de enige los-/laadplek (77,83%) en de eerste straatplek (66,93%) in de interactieve modus volgens verwachting het hoogste zijn. Bij de zesde straatplek (13,02%) is de bezettingsgraad het laagste en straatplekken 7 en 8 zijn niet in gebruik genomen in het systeem. Ook in het basecase scenario tonen de gemiddelde bezettingsgraden een afloop volgens de volgorde van de straat. Los-/laadplek A heeft als eerste plek een hoogste gemiddelde bezetting van 81,02% en straatplek 8 heeft als laatste plek een laagste bezetting van 6,93%. Deze uitkomsten komen overeen met de verwachtingen.

37

Daarnaast zijn de doorrijdtijden van de entiteiten bekeken. In de uitkomsten van het basecase scenario waren zoals verwacht grote verschillen te zien tussen de gemiddelde tijd in het systeem van het reguliere verkeer (6:34 minuten) en het logistieke verkeer (24:30 minuten) die naast het doorrijden ook tijd besteden aan laden/lossen. Wanneer het reguliere verkeer geen vertraging ondervindt op de weg, bedraagt de doorrijdtijd 25,6 seconden. Dit klopt volgens de berekening dat het reguliere verkeer met een gemiddelde snelheid van 12,5 m/s (45 km/u) door een straat van 320 meter rijdt ($320/12,5 = 25,6$).

In een uitgevoerde gevoeligheidsanalyses komt naar voren dat het model juiste resultaten genereert op de invoer van extreme waarden. Bij de afwezigheid van het logistieke verkeer kan het reguliere verkeer gemiddeld in optimale snelheid het systeem doorrijden (Rijkers, 2017). Dit betekent dat de vertraging in het basecase scenario daadwerkelijk aan het samenspel tussen beide soorten verkeer valt te onderschrijven. Daarnaast is getest of de snelheid direct verband houdt met de doorrijdtijd van het verkeer in het systeem. Ook dit verband is duidelijk aanwezig in het model.

Validatie van het model

Validatie van het gebouwde model in Simio is nodig om te controleren of het juiste model is gemaakt volgens het werkelijke te modelleren systeem.

De interarrival time van zowel het logistieke verkeer als reguliere verkeer is volgens Poisson-verdeling gemodelleerd. Een Poissonverdeling kan volgens Brooks (2007) worden gebruikt wanneer de gebeurtenis in gehele waarden kan worden geteld, de gebeurtenissen onafhankelijk van elkaar voorkomen, het gemiddelde over een bepaalde tijd bekend is en het mogelijk is om het aantal gebeurtenissen in een bepaalde tijd te tellen en het onnodig is te tellen hoe vaak de gebeurtenissen niet zijn voorgekomen. Dit legitimeert de keuze voor een Poisson verdeling.

De los-/laadtijden van de logistieke voertuigen zijn volgens exponentiële verdeling gesimuleerd. De los-/laadtijden zijn onafhankelijk van elkaar en van de aankomsttijden en daarom exponentieel verdeeld (Kelton et al., 2014). De andere variabelen, zoals de fysieke gegevens van de straat zijn uit het werkelijke systeem van de Witte de Withstraat verkregen. In Simio is het mogelijk om de lengtes van paden volgens de werkelijkheid na te bootsen en hier ook de werkelijke snelheden op toe te passen. De bovengenoemde variabelen kunnen allemaal als valide worden beschouwd.

Naast bovengenoemde validatie moet het model ook outputvariabelen genereren die antwoord kunnen geven op de onderzoeksvraag. Om antwoord te kunnen geven over de relatie tussen de filevorming en de los-/laadplek in de straat, worden outputvariabelen gegenereerd van de tijd dat het verkeer in het systeem is. Op deze manier kan de gemiddelde doorrijdtijd van het verkeer en de gemiddelde vertraging gemeten worden. Daarnaast genereert het model output over de bezetting van de los-/laadplekken en het op straat parkeren. Op deze manier kan in het model gespeeld worden met het aantal en de locatie van de los-/laadplekken en worden adequate resultaten gegenereerd om antwoord te kunnen geven op de onderzoeksvraag.

Simulatie experimenten

De experimenten zijn een belangrijk onderdeel van dit onderzoek om de relatie tussen de filevorming en los-/laadplekken in de straat nader te onderzoeken. Er zijn vier soorten experimenten opgesteld:

- Experiment 1 richt zich op het aantal los-/laadplekken in de straat.
- Experiment 2 analyseert de locatie van de los-/laadplek onderzocht.
- Experiment 3 is een combinatie van Experiment 1 en 2 waarbij combinaties van zowel de locatie als het aantal van de los-/laadplekken in de straat worden bestudeerd.
- Experiment 4 is een experiment waarin een lagere toegestane snelheid voor regulier en logistiek verkeer onderzocht wordt.

Experiment 1 – Verandering in aantal los-/laadplekken

In dit experiment wordt de relatie tussen het aantal los-/laadplekken en de filevorming in de straat onderzocht. In scenario 1 (basecase scenario) is er één los-/laadplek aanwezig op 2/5 van de totale straatlengte (128 meter). In de andere scenario's zijn er twee of drie los-/laadplekken aanwezig in de straat. In scenario 2 worden zowel op 64 meter als op 128 meter los-/laadplekken beschikbaar gesteld. In scenario 3 wordt er nog een los-/laadplek aan toegevoegd op 192 meter.

Experiment 2 – Verandering van locatie los-/laadplekken

In dit experiment wordt de relatie tussen de locatie van de los-/laadplekken en de filevorming in de straat onderzocht aan de hand van twee extra scenario's, scenario 4 en 5. In scenario 4 is er één los-/laadplek op 1/5 (64 meter) aanwezig. In scenario 5 bevindt de los-/laadplek zich op 3/5 (192 meter).

Experiment 3 – Optimale combinatie van aantal en locatie

In experiment 3 wordt geëxperimenteerd met zowel de locatie van de los-/laadplekken als het aantal plekken. Er worden naast scenario 1 (1 plek op 2/5) nog vier scenario's uitgevoerd. In scenario 6 is er een plek op 1/5 (64 meter) en een op 3/5 (192 meter). In scenario 7 zijn er ook maar twee plekken, eentje op 1/5 en de andere op 2/5 van de straat. In scenario 8 bevinden de twee plekken zich op 2/5 en 3/5. Tot slot zijn er in scenario 9 drie plekken op 1/5, 2/5 en 3/5 van de straat.

Experiment 4 – Variatie in toegelaten snelheden

In experiment 4 wordt de relatie tussen de filevorming en de toegelaten snelheden in de Witte de Withstraat nader bestudeerd. Naast het basecase scenario 1, worden drie scenario's uitgevoerd. In scenario 10 heeft al het verkeer een snelheid van 30 km/uur in de huidige situatie met één los-/laadplek. In scenario 11 blijft de snelheid gelimiteerd tot 30 km/uur, nu met twee los-/laadplekken in de straat. In scenario 12 is de snelheid nog steeds 30 km/uur en zijn er drie los-/laadplekken in de straat aanwezig.

Tabel 3 Resultaten experimenten en scenario's

SCENARIO	KPI				
	Gemiddelde doorrijdtijd regulier verkeer	Gemiddelde doorrijdtijd logistiek verkeer	Bezettingsgraad straatplekken	Gebruik los-/laadplekken	Gemiddelde los-/laadtijd
	minuten	minuten	procent	procent	minuten
Experiment 1 Scenario 1 (base case)	6:34 min {6:47;6:21}	24:30 min {24:12;24:48}	41,62% {40,95;42,29}	18,09% {17,64;18,54}	20:43 min {20:04;21:22}
Experiment 1 Scenario 2	5:18 min {5:06;5:30}	23:30 min {23:12;23:49}	32,79% {32,12;33,45}	36,40% {35,75;37,05}	19:40 min {19:01;20:19}
Experiment 1 Scenario 3	4:05 min {3:55;4:15}	22:35 min {22:17;22:53}	25,30% {24,64;25,95}	51,70% {50,97;52,44}	19:38 min {19:05;20:11}
Experiment 2 Scenario 4	6:29 min {6:16;6:42}	24:12 min {23:53;24:31}	41,40% {40,70;42,09}	18,51% {18,05;18,97}	20:04 min {19:28;20:40}
Experiment 2 Scenario 5	6:32 min {6:19;6:45}	24:26 min {24:07;24:45}	41,33% {40,64;42,03}	18,60% {18,16;19,03}	20:00 min {19:26;20:34}
Experiment 3 Scenario 6	5:18 min {5:06;5:30}	23:25 min {23:07;23:43}	32,68% {31,99;33,36}	36,33% {35,67;36,99}	19:52 min {19:18;20:26}
Experiment 3 Scenario 7 (2)	5:18 min {5:06;5:30}	23:30 min {23:12;23:49}	32,79% {32,12;33,45}	36,40% {35,75;37,05}	19:40 min {19:01;20:19}
Experiment 3 Scenario 8	5:18 min {5:06;5:30}	23:30 min {23:12;23:48}	33,11% {32,46;33,77}	35,94% {35,33;36,54}	19:53 min {19:34;20:27}
Experiment 3 Scenario 9 (3)	4:05 min {3:55;4:15}	22:35 min {22:17;22:53}	25,30% {24,64;25,95}	51,70% {50,97;52,44}	19:38 min {19:05;20:11}
Experiment 4 Scenario 10	8:22 min {8:07;8:38}	25:45 min {25:25;26:05}	40,70% {40,05;41,36}	18,62% {18,18;19,05}	19:39 min {19:06;20:12}
Experiment 4 Scenario 11	6:53 min {6:39;7:07}	24:54 min {24:33;25:14}	32,66% {32,00;33,32}	36,15% {35,53;36,77}	19:49 min {19:14;20:24}
Experiment 4 Scenario 12	4:53 min {4:41;5:05}	23:08 min {22:49;23:27}	24,30% {23,68;24,92}	52,28% {51,54;53,02}	19:51 min {19:15;20:27}

In experiment 1 is geëxperimenteerd met het aantal los-/laadlocaties in de straat. Per extra los-/laadplek in de straat neemt de gemiddelde doorrijdtijd van het reguliere verkeer met ruim een minuut af. Een tweede plek zorgt voor een afname van 1:16 minuten, een derde voor een extra afname van 1:13 minuten. Vergelijkbare resultaten zijn te vinden bij de doorrijdtijd van het logistieke verkeer, die neemt bij een tweede plek af met 1 minuut, een derde plek zorgt voor extra 55 seconden tijdwinst. De twee extra plekken zorgen samen voor bijna 40% afname van de bezetting van straatplekken. Minder lossen en laden op straat betekent een toename van het gebruik van de los-/laadplekken. Dit gebruik verdubbelt met de eerste extra plek, een tweede plek zorgt nogmaals voor een flinke toename. Met drie los-/laadplekken kan ruim de helft van de leveranciers gebruik maken van een officiële plek.

In het 2e experiment zijn de locaties van de los-/laadplekken de variabelen geweest. Enkel de locatie veranderen heeft geen directe effecten op de doorrijdtijden van het verkeer, de bezetting van de straat en het gebruik van de los-/laadplekken. De resultaten van de scenario's toonden onderling in de statistische onafhankelijke T-toets onvoldoende verschillen om conclusies te kunnen trekken over de uitkomsten.

In experiment 3 is geëxperimenteerd met combinaties van verschillende aantallen en locaties van los-/laadplekken. De drie combinaties met twee plekken om te lossen/laden (scenario 6, 7 en 8) leveren vergelijkbare resultaten op met scenario 2. De resultaten over alle KPI's genomen waren in de scenario's met plekken op 1/5 & 2/5 (scenario 7) en 1/5 & 3/5 (scenario 6) het beste. Er dient opgemerkt te worden dat de gemiddelde los-/laadtijd van het logistieke verkeer bij twee plekken op 1/5 & 2/5 een stuk lager is dan in de huidige situatie, namelijk 19:40 in vergelijking tot 20:43 minuten. Deze tijd is ook aanwijsbaar lager dan in de andere combinaties van twee plekken, die niet significant verschillen van de huidige situatie. Zoals tevens in experiment 1 naar voren kwam, is de combinatie van drie los-/laadplekken (scenario 9) voor alle KPI's gunstiger dan de combinaties van twee plekken.

In experiment 4 is getest wat de invloed van een lagere snelheid van het verkeer bij de combinaties in aantal en locatie van de los-/laadplekken is. Bij een verlaagde snelheid naar 30 km/uur nemen de doorrijdtijden van zowel het reguliere verkeer als het logistieke verkeer aanzienlijk toe. De optimale doorrijdtijd van de auto's zou van 25,6 seconden bij 45 km/uur naar 38,4 seconden bij 30 km/uur moeten gaan. In werkelijkheid gaat de gemiddelde doorrijdtijd in het geval van één los-/laadplek omhoog van 6:34 naar 8:22 minuten (scenario 10). In het geval van een extra los-/laadplek wordt de winst in doorrijdtijden redelijk gecompenseerd met het verlies door de verlaagde snelheid (scenario 11). Bij drie los-/laadplekken en een verlaagde snelheid is er wel winst op alle KPI's ten opzichte van de huidige situatie. De doorrijdtijden zijn respectievelijk 4:53 en 23:08 minuten (scenario 12). Deze winsten op de doorrijdtijden zijn echter kleiner dan in het scenario met drie los-/laadplekken en een normale snelheid (scenario 3). De bezetting van de straatplekken is hierop een uitzondering.

Bij een verlaagde snelheid en drie plekken is dit voor de bezetting van de straatplekken 24,30% in plaats van 25,30% (41,62% in de huidige situatie). Dit geldt ook voor het gebruik van de los-/laadplekken bij drie plekken, dit is bij de verlaagde snelheid 52,28% tegenover 51,70% bij normale snelheid (18,09% in scenario 1).

Conclusies

Uit de experimenten komt naar voren dat de toevoeging van een extra los-/laadplek in de Witte de Withstraat een zeer positieve invloed heeft op de gemiddelde doorrijdtijden van het reguliere en logistieke verkeer. Ook wordt er dan aanzienlijk minder op straat geparkeerd om te laden en lossen, de los-/laadplekken worden meer gebruikt door de leveranciers. Bij de toevoeging van een derde los-/laadplek is de totale winst op alle aspecten nog groter.

Als besloten zou worden 1 extra plek aan te leggen, luidt het advies deze op 64 meter in de straat aan te leggen. Op 128 meter ligt de al bestaande plek. De verschillen tussen de combinatie van twee plekken op 64 en 128 meter en de combinatie van twee plekken op 128 en 192 meter zijn echter zeer beperkt. Andere factoren zoals de locatie van de te beleveren ondernemers of andere infrastructurele aspecten zouden hierin doorslaggevend kunnen zijn.

Wanneer in de huidige situatie de toegestane snelheid naar 30 km/uur wordt verlaagd, heeft dit een zeer negatieve invloed op de doorrijdtijden van het verkeer. Dit zou grofweg gecompenseerd kunnen worden met de winst van een tweede los-/laadplek in de straat. Wanneer er ondanks de verlaagde snelheid nog winst op de doorrijdtijden gewenst is, zijn drie los-/laadplekken noodzakelijk. Dit zou daarnaast een winst op het gebruik van de los-/laadplekken en een positieve afname van op straat parkeren opleveren. Echter, voor optimale winst op doorrijdtijden blijft het de beste oplossing om drie los-/laadplekken te hebben en de huidige snelheid te behouden.

Er is in dit onderzoek geen rekening gehouden met de werkelijke verdeling van ondernemers over de lengte van de straat. Deze verdeling van bestemmingen zal medebepalen waar leveranciers willen en zullen stoppen om te laden en te lossen. In het huidige onderzoek zijn de leveranciers zonder specifieke bestemmingen in de straat gaan laden/lossen. Daarnaast zijn een aantal aanvullende aannames gedaan om het model als vereenvoudigd systeem van de werkelijkheid te maken en zo meer focus op de belangrijkste te onderzoeken elementen te leggen (Hillston, 2006). Dit betekent wel dat de conclusies gelden voor dit afgebakende systeem en slechts gedeeltelijk gelden voor de werkelijke situatie. Verder zijn andere bevoorradingsconcepten ook mogelijk met behulp van hubs en elektrische vrachtfietsen, maar dit is buiten dit onderzoek gehouden, omdat hier al vele goede onderzoeken naar hebben plaatsgevonden (o.a. Ploos van Amstel e.a., 2018).

Toch kan geconcludeerd worden dat een simulatieaanpak een goed inzicht kan geven in de dynamiek van het stadslogistieke vervoersbewegingen. Meer gedetailleerde informatie is terug te vinden in het bachelorrappport van Rijkers (2017).

Referenties

- Akkerman, T., Amgar, K., Groot, R. de, Koenraadt, J., & Verkade, R. (2016). Onderzoek naar mogelijke oplossingen voor congestie in de Witte de Withstraat. Geraadpleegd van www.kennisdcologistiek.nl/system/downloads/attachments/000/000/235/original/Eindrapport_Witte_de_Withstraat.pdf?1492068720
- Aiura, N. & Taniguchi, E. (2006). Planning on-street loading-unloading spaces considering the behavior pickup-delivery vehicles and parking enforcement. In E. Taniguchi & R. G. Thompson (Eds.), *Recent Advances in City Logistics*. Emerald Group Publishing Limited.
- Brooks, E. B. (2007, 24 augustus). Statistics: The Poisson distribution. Geraadpleegd van www.umass.edu/wsp/resources/poisson/
- Ernsting, Z. (2016, 13 oktober). Een autoluwe stad heeft de toekomst. Geraadpleegd van <https://joop.bnnvara.nl/opinies/autoluwe-stad-toekomst>
- Gemeente Rotterdam. (2008). Binnenstad als citylounge: Focus 2014-2018. Geraadpleegd van www.rotterdam.nl/wonen-leven/binnenstad/Focusdocument-CITY-LOUNGE.pdf
- Google, Inc.. (2016, mei). [Street view Witte de Withstraat, Rotterdam]. Geraadpleegd op 10 oktober 2017, van www.google.nl/maps/@51.9159829,4.4786313,3a,75y,225.85h,75.92t/data=!3m7!1e1!3m5!1sv4v0eOdFo8XmCz9ov5BsBw!2e0!6s%2F%2Fgeo3.ggpht.com%2Fcbk%3Fpanoid%3Dv4v0eO
- Hillston, J. (2006). Model validation and verification. In A. K. Satsel, & Y. Barlas (Red.), *System dynamics review* (pp. 102-108). Geraadpleegd van www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/ms/notes/note14.pdf
- Kelton, W. D., Smith, J. S., & Sturrock, D. T. (2014). *Simio and simulation: Modeling, analysis, applications* (3e ed.). Charleston, SC: Createspace Independent Platform.
- Korn, G. A. (1998). *Numerical insights into dynamic systems*. Amsterdam, Nederland: Gordon and Breach Science.
- McLeod, F. & Cherrett, T. (2011). Loading bay booking and control for urban freight, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 14:6, 385-397, DOI:10.1080/13675567.2011.641525
- Niedźwiedzka, A., Lipiński, S., & Kornet, S. (2017). Verification of CFD tool for simulation of cavitating flows in hydraulic systems. *Journal of Hydroinformatics*, 19(5), 653-665. doi:10.2166/hydro.2017.004
- Nijhuis, R. (1999, 12 februari). Kwalitatieve SAP R/3-implementatie vergt speciale benadering. Geraadpleegd van www.computable.nl/artikel/achtergrond/erp/1419393/1444691/kwalitatieve-sap-r-3-implementatie-vergt-speciale-benadering.html

- Oliveira, L. K. de, & Dias Guerra, E. (2014). A diagnosis methodology for urban goods distribution: A case study in Belo Horizonte City (Brazil). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125, 199-211. doi:10.1010/j.sbspro.2014.01.1467
- Pace, D. K. (2000). Ideas about simulation conceptual model development. *APL Technical Digest*, 21(3), 327-336. Geraadpleegd van <http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td2103/pace2.pdf>
- Ploos van Amstel, W., Balm, S., Warmerdam, J., Boerema, M., Altenburg, M. Rieck, F., Peters, T., (2018). Eindrapport: Stadslogistiek: Licht en Elektrisch, Onderzoeksprogramma LEVV-LOGIC: Onderzoek naar lichte elektrische vrachtvoertuigen. Hogeschool van Amsterdam
- Rijkers, E., (2017). Een kwantitatief onderzoek naar een verbetering van de congestieproblematiek in de Witte de Withstraat, Rotterdam. Inzicht verkrijgen in de relatie tussen congestie en los-/laadplekken. TB351a – Bachelor Eindproject Technische Bestuurskunde, Fase 2, November 2017, Faculteit van Techniek, Bestuur en Management, Technische Universiteit Delft.
- Robinson, S. (2008). Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. *Journal of the Operational Research Society*, 59(3), 278-290. Geraadpleegd van <https://link.springer.com/article/10.1057/palgrave.jors.2602368>
- 44 Robinson, S. (2008). Conceptual modelling for simulation Part II: a framework for conceptual modelling. *Journal of the Operational Research Society*, 59(3), 291-304. Geraadpleegd van <https://link.springer.com/article/10.1057/palgrave.jors.2602369>
- Sargent, R. G. (2011). Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Paper gepresenteerd op de 2011 Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ. Geraadpleegd van www.informs-sim.org/wsc11papers/016.pdf
- Tako, A. A., & Robinson, S. (2012). The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, 52(4), 802-815. doi:10.1016/j.dss.2011.11.015
- Wikipedia. (2016, 7 oktober). Witte de Withstraat (Rotterdam). Geraadpleegd van [https://nl.wikipedia.org/wiki/Witte_de_Withstraat_\(Rotterdam\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Witte_de_Withstraat_(Rotterdam))

