

**Exploitatieanalyse tijdens infrastructuurontwerp  
De HTM Rail Simulatie Suite**

Hilbert Veldhoen  
HTM Personenvervoer  
Afdeling Vervoersontwikkeling  
E-mail: [H.Veldhoen@HTM.net](mailto:H.Veldhoen@HTM.net)

Niels van Oort  
HTM Personenvervoer / TU Delft  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Transport and Planning  
E-mail: [N.van.Oort@HTM.net](mailto:N.van.Oort@HTM.net)

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk  
19 en 20 november 2009, Antwerpen**

## **SAMENVATTING**

### *Exploitatieanalyse tijdens infrastructuurontwerp*

Het plannen en aanleggen van stedelijke railinfrastructuur is een langdurig, kostbaar en complex proces. Dit paper presenteert de HTM Rail Simulatie Suite (HRS) om tijdens het ontwerp van railinfrastructuur al exploitatie te kunnen testen. De HRS bevat een bibliotheek van herbruikbare generieke componenten die gebruikt kunnen worden om modellen te ontwikkelen. De HRS ondersteunt ontwerpers in het analyseren van de dynamische aspecten van railgebonden openbaar vervoer in een stedelijke omgeving. Dit paper laat zien dat met behulp van de HRS op een eenvoudige manier diverse varianten van de infrastructuur getest kunnen worden op hun effect op de exploitatie. De uitvoer (tabellen, grafieken, filmpjes) maakt het mogelijk om over de verschillende alternatieven goed te communiceren en de voor- en nadelen goed af te wegen.

## 1. INLEIDING

Het plannen en aanleggen van stedelijke railinfrastructuur is een langdurig, kostbaar en complex proces. Op het moment dat de infrastructuur gereed is gekomen, liggen de (on)mogelijkheden voor exploitatie voor tientallen jaren vast. Aanpassen of uitbreiden van infrastructuur op dat moment is vaak extra kostbaar en moeizaam, ten opzichte van de oorspronkelijke aanleg. In de onderzoekswereld is veel aandacht voor infrastructuurplanning bij de spoorwegen. Uitgebreide analyses van de effecten van de toekomstige infrastructuur op exploitatie zijn gemeengoed. Het gaat daarbij met name over capaciteitsanalyses: welk vervoeraanbod (zowel kwalitatief als kwantitatief) wil ik bieden en welke infrastructuur hoort daarbij [1, 10, 18]? In de wereld van stedelijke rail (in dit paper gedefinieerd als tram en light rail) zijn deze analyses niet onbekend, maar worden ook niet consequent toegepast. Met name de relatie tussen de infrastructuur en de toekomstige exploitatie (met alle dynamiek van de stad) wordt vaak niet of niet goed meegenomen in analyses [4, 9, 13, 16]. Door toenemende frequenties, drukker overig verkeer en een grotere focus op kwaliteit en efficiëntie wordt een goede, meer realistische voorspelling van de exploitatie echter steeds belangrijker. Onontbeerlijk zijn zowel een goede kennis van de (verwachte) exploitatie (op basis van management informatie of ervaring van bestaande, vergelijkbare systemen) en de mogelijkheid om te kunnen voorspellen wat het effect is van bepaalde keuzes in het ontwerpproces. Dit voorspellen is een complexe taak, doordat veel processen en variabelen een rol spelen. Naast de infrastructuur zijn ook de exploitatiestrategieën en de dienstregeling van groot belang: thema's als prioriteit [11], het toepassen van buffers [2, 17] en beheersstrategieën [13, 14] spelen hierin een grote rol. Ceder [3] stelt dat verschillende processen gelijktijdig geanalyseerd moeten worden om een goede voorspelling te kunnen maken. Gezien deze complexiteit is simulatie een goed middel [7] Omdat er, in tegenstelling tot de spoorwegwereld, nog geen geschikte simulatietools zijn voor stedelijk OV, hebben TU Delft en HTM voor bovengenoemde analyse een simulatie suite ontwikkeld [7, 8]. Dit paper beschrijft deze suite en aan de hand van een case wordt de toegevoegde waarde getoond.

De paper is als volgt opgebouwd: hoofdstuk twee beschrijft de simulatietool, waarna in hoofdstuk drie de case uit Groningen wordt geïntroduceerd. Hoofdstuk vier laat de resultaten zien van de analyse van deze case, waarna het paper afsluit met conclusies en referenties.

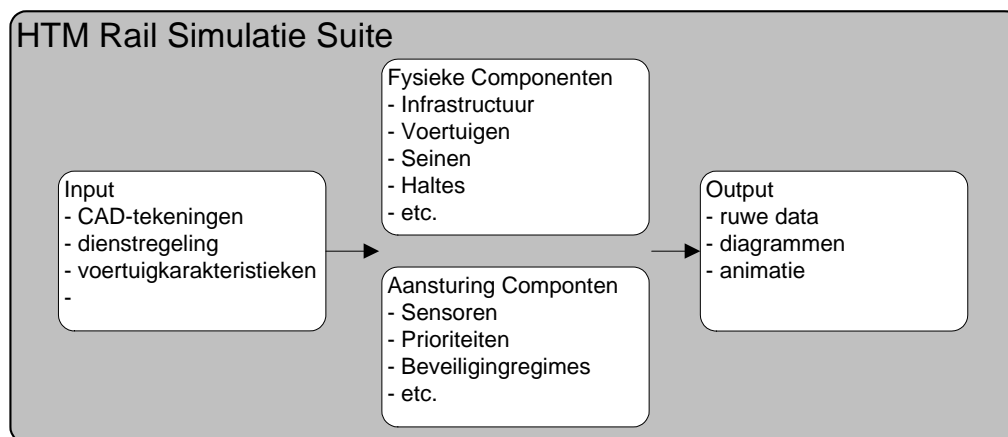
## 2. HTM RAIL SIMULATIE SUITE

De HTM Rail Simulation Suite (HRS) bevat een bibliotheek van herbruikbare generieke componenten die gebruikt kunnen worden om modellen te ontwikkelen (zie figuur 1). De suite ondersteunt ontwerpers in het analyseren van de dynamische aspecten van railgebonden openbaar vervoer in een stedelijke omgeving.

De suite is een *microscopisch, dynamisch, voorspellend verkeersmodel*, dat gebruik maakt van *stochastische* verdelingen.

- *verkeersmodel*; het model simuleert de fysieke verplaatsingen (de exploitatie) van trams in een omgeving. Het model is geen vervoersmodel dat een verkeersvraag kan bepalen.

- *microscopisch*; er wordt uitgegaan van de kleinste eenheid, een tram, die zich o.b.v. gedragsregels (voertuigkarakteristieken, bestuurdersprofielen) verplaatst in het netwerk.
- *dynamisch*; het simulatiemodel is in staat om de invloed die verschillende gebruikers van de infrastructuur op elkaar hebben te modelleren. Denk hierbij aan filevorming en capaciteitsverlies door onregelmatigheid, de gevolgen van prioriteitstoewijzingen en andere beheersmaatregelen of de gevolgen van de reconstructie van een kruispunt of het aanleggen van een nieuwe halte.
- *stochastisch*; voor het bepalen van wachttijden, halteertijden, etc. wordt gebruik gemaakt van 'getrokken' waarden uit kansverdelingen. Dit resulteert o.a. in verschillende rijtijden voor afzonderlijke tramritten, net als in de werkelijkheid.
- *voorspellend*; m.b.v. huidige data en te verwachten (toekomstige) invloedsfactoren wordt o.b.v. extrapolatie van trends of toepassing van een theorie een voorspelling gemaakt van een toekomstige situatie.



Figuur 1: De HTM Rail Simulatie Suite

Een uniek kenmerk van de bibliotheek is dat de componenten in staat zijn om te gaan met "rijden op zicht", een belangrijk aspect in *tram* en *light rail* exploitatie. In *heavy rail* gerelateerde exploitatie rijden voertuigen in een beveiligd bloksysteem, waar de meeste simulatiemodellen zich derhalve op richten.

Een andere verdienste is dat de suite in staat is om gelijktijdig discrete en continue processen te simuleren. De weergave van een verkeerslicht is bijvoorbeeld een discreet proces, terwijl de beweging van een voertuig een continue proces is. Het weergeven van verschillende processen wordt ondersteund door de DSOL simulatie omgeving [6], waarop de bibliotheek is gebouwd.

Het model kan worden verdeeld in twee lagen, een laag met fysieke componenten en een laag met aansturingcomponenten. Hierdoor kan aan een bepaalde fysieke component verschillende gedragingen worden toegekend. Zo kan bijvoorbeeld een verkeerslicht op verschillende manieren worden geconfigureerd, namelijk als vaste groentijden in een bepaalde cyclus of afhankelijk van de actuele verkeerssituatie.

## 2.1 Functies van de HRS

De infrastructuur van een model, zoals het spoor, de wissels, signalering, haltes, etc. wordt gedefinieerd middels *real-world* coördinaten, die verkregen worden uit CAD- of GIS-software tijdens het ontwerpen van de infrastructuur. Als het model op de juiste

wijze is geconfigureerd kan de infrastructuur precies overeenkomen met de werkelijke situatie. In de animatie is het mogelijk om verschillende kaarten te gebruiken als achtergrond, wat betrokkenen helpt in het identificeren van het weergegeven model. In de screenshots (figuur 5) kan dit effect gezien worden.

Het gedrag van de voertuigen berekent de suite op basis van de ingevoerde voertuigkarakteristieken, de bestuurdersprofielen en de snelheidsbegrenzing. De standaard acceleratie en deceleratie van een voertuig zijn bepaald door het fysieke snelheidsprofiel van het voertuig. Vervolgens wordt de daadwerkelijke versnelling of vertraging van een voertuig bepaald door het bestuurdersprofiel, als bijvoorbeeld een rustige of een agressieve rijstijl. De snelheidsbegrenzing wordt bepaald door de maximaal haalbare snelheid van het voertuig, de snelheidsbegrenzings op bepaalde trajectdelen (voetgangersgebied, vrije baan, binnen/buiten bebouwde kom, etc.) en andere relevante factoren zoals verkeerslichten of overig verkeer. Verticaal alignment wordt vooralsnog niet meegenomen in de modellen, alhoewel dit wel van invloed is op de prestaties van het voertuig.

Voor halteertijden en wachttijden bij kruisingen wordt een waarde getrokken uit een kansverdeling die gebaseerd is op empirische data. Deze kunnen geconfigureerd worden voor een specifieke locatie en bijvoorbeeld afhankelijk worden gemaakt van het tijdstip op de dag.

Als de voertuigen op basis van een dienstregeling zich door het netwerk verplaatsen wordt output gegenereerd voor nadere analyse. Deze output bestaat uit reistijden, wachttijden, v-t, x-t, v-x diagrammen, per lijn, per voertuig, per richting.

Van elke rit worden grafieken van afgelegde weg, rijtijd en snelheid geproduceerd. Voor eventuele verdere analyses worden deze gegevens door het model ook in tabelvorm weergegeven. Dit betreft zowel de minimale rijtijd over het tracé als de gemiddelde rijtijd en de spreiding hierin. Oponthoud bij o.a. haltes en kruisingen wordt gelokaliseerd en inzichtelijk gemaakt. Tevens wordt duidelijk of de geïmplementeerde dienstregeling haalbaar is met het beschikbare aantal voertuigen en komen stiptheidsafwijkingen aan het licht.

Een dynamische visualisatie van de trambewegingen is zowel voor het gehele tracé als voor afzonderlijke tracédelen mogelijk. Met name voor (beoogde) knelpunten in het tracé geeft deze visualisatie goed inzicht in de verkeersafwikkeling ter plekke.



(a) Tijd – Snelheid diagram

(b) Tijd – Afstand diagram

(c) Afstand – Snelheid diagram

Figuur 2: verschillende diagrammen als output van de HRS

In figuur 2 zijn enkele diagrammen weergegeven die als output uit het model komen. In deze diagrammen staat alle informatie over één specifiek voertuig. De diagrammen laten een voertuig zien dat van Zernike naar het Hoofdstation rijdt. Dit is te zien aan de lage

snelheid aan het einde van de grafieken, waar de voertuigen door het voetgangersgebied rijden. In (c) zijn duidelijk de versnelling en vertraging van het voertuig te zien.

### 3. CASE: REGIOTRAM GRONINGEN

#### 3.1 *Introductie*

Het beschreven simulatiemodel is toegepast in het kader van de ontwikkeling van een nieuwe tramverbinding in de stad Groningen. Momenteel rijden er per dag zo'n 900 bussen door het centrum. Bij de verwachte 40% groei van de mobiliteit in de regio Groningen zullen er 1.200 bussen door het centrum rijden in 2020, bij ongewijzigd beleid [15]. De bestaande busdiensten zijn echter niet in staat deze groei op te vangen, waardoor naar alternatieven is gezocht. Op dit moment zijn er twee nieuwe tramlijnen gepland. Van lijn 1 is het voorkeustracé vastgesteld tussen het Hoofdstation en Zernike (figuur 3), de campus van de Rijksuniversiteit Groningen. De planning is om in 2014 te beginnen met de exploitatie van lijn 1. Kort daarna zal lijn 2 hierop worden aangesloten van het Hoofdstation naar de wijk Kardinging, via het Gronings Universitair Medisch Centrum. Het tracé van lijn 2 is nog niet vastgesteld. Het Projectbureau verwacht voor lijn 1 en 2 een vervoerwaarde van respectievelijk ca. 28.000 en 25.000 reizigers per dag. De wens van het Projectbureau is om lijn 1 met 6 voertuigen te exploiteren in een 7,5 minuten dienst (8 trams per uur), exclusief het benodigde reservematerieel.



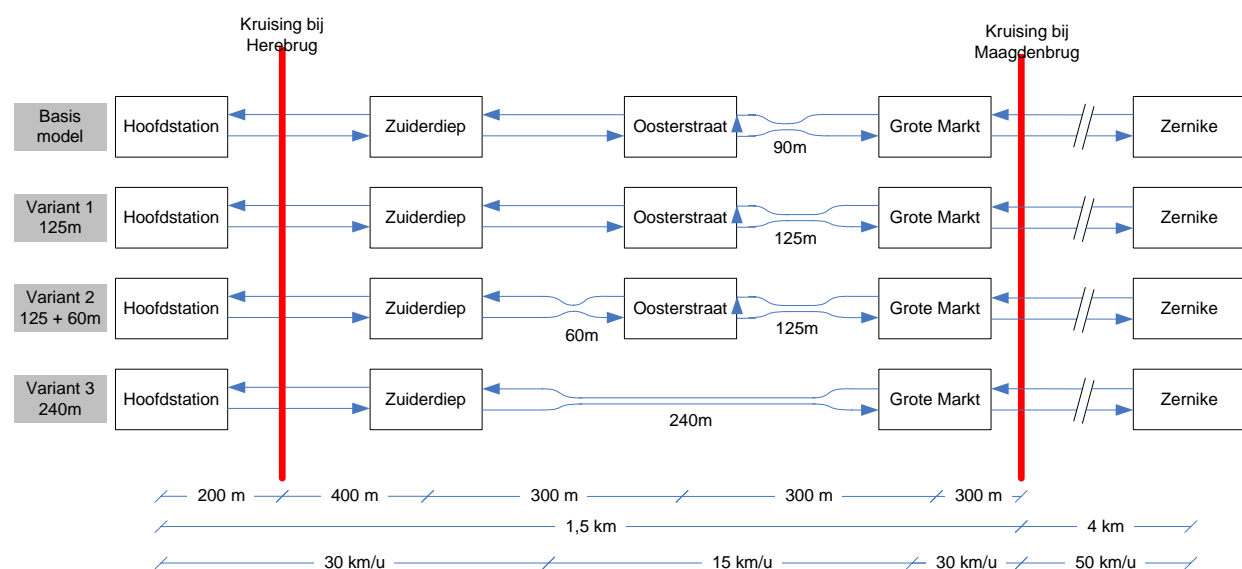
Figuur 3: Het voorkeustracé van lijn 1 van Hoofdstation naar Zernike

Voor deze case beperken we ons tot een analyse van de exploitatie van lijn 1, waarbij een viertal varianten van het strengelspoor in de Oosterstraat geanalyseerd zullen worden (figuur 3, bij A). In de analyse worden een tweetal scenario's bekeken, namelijk het eerste scenario waarin alleen lijn 1 door het centrum rijdt (8x/uur) en het tweede scenario is dat lijn 2 eveneens door het centrum gaat en na de Maagdenbrug (figuur 3, bij B) afbuigt naar Kardinge. In het tweede scenario rijden er per richting dus 16 voertuigen per uur door het centrum. Een bijkomend aspect is het toekennen van een korte buffer op het Hoofdstation. Er zijn namelijk twee mogelijkheden om de lijnen te exploiteren. Als een ringlijn van Zernike/Kardingen via het Hoofdstation terug naar het beginpunt, waarbij het Hoofdstation als een gewone halte wordt gezien, waarbij lijn 1 een lengte heeft van 11 km. Een tweede mogelijkheid is om het Hoofdstation eveneens als een eindpunt te zien, waarbij een korte buffertijd wordt toegekend in de dienstregeling zodat voertuigen weer af kunnen stemmen op de dienstregeling [4].

De vraag is wat de impact van de verschillende varianten en scenario's is op de rijtijd van lijn 1. De rijtijd en met name de spreiding rond het gemiddelde is bepalend voor de mogelijkheid om deze lijn met 6 voertuigen te exploiteren.

### 3.2 Lijnkarakteristieken

De modellen zijn ontwikkeld op basis van CAD-tekeningen die het Projectbureau heeft aangeleverd. De lengte van lijn 1 van Zernike naar het Hoofdstation is ca. 5,5km. Daarvan gaat ca. 1,5km. via het centrum en 4km. via de woonwijken tussen het centrum en Zernike. In totaal zijn er 12 haltes, waarvan 5 geclassificeerd zijn als 'druk' en de overige 7 als 'rustig', gebaseerd op aannames van de reizigersaantallen per halte [5]. De halteertijden die gemodelleerd zijn, worden geschat op basis van werkelijke halteertijden in relatie tot het aantal in- en uitstappers in Den Haag. Als drukke haltes zijn aangemerkt het Hoofdstation, Zuiderdiep, Grote Markt, Noorderstation en Zernike.



Figuur 4: De 4 varianten van het strengelspoor die gemodelleerd zijn in de HRS

In het basismodel heeft het strengelspoor in de Oosterstraat een lengte van 90 meter tussen de haltes Oosterstraat en Grote Markt. Er zijn drie varianten ontwikkeld om aan

de wens van de winkeliers te kunnen voldoen om meer laad- en losruimte te creëren. Te weten:

1. Variant 1 heeft een strengelspoor van 125 meter, dat is het deel van het basismodel plus de bocht van de Oosterstraat naar de markt.
2. Variant 2 heeft dezelfde 125 meter tussen de haltes Oosterstraat en Grote Markt plus een gedeelte strengelspoor van 60 meter tussen de haltes Oosterstraat en Zuiderdiep.
3. Variant 3 heeft gedeelte strengelspoor tussen de haltes Grote Markt en Zuiderdiep, met een lengte van 240 meter, waarbij de halte Oosterstraat is vervallen.

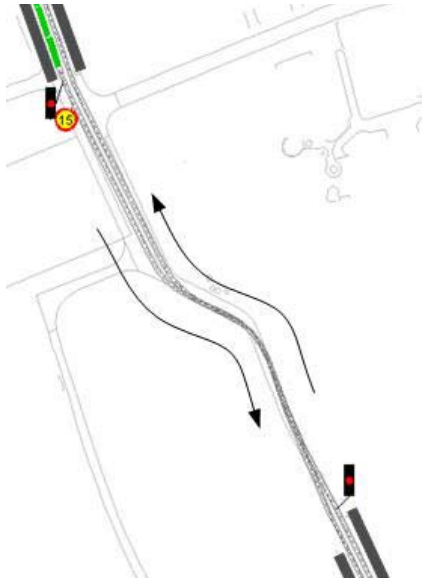
Het basismodel en de drie varianten worden gesimuleerd met twee verschillende frequenties. Namelijk:

1. de hele lijn met een frequentie van 8x per uur, hierbij wordt vooralsnog geen rekening gehouden met frequentiewisselingen gedurende de dag.
2. lijn 1 met een frequentie van 8x per uur en een frequentieverdubbeling (16x/u) op het centrumdeel van Hoofdstation tot Maagdenbrug. Deze verdubbeling wordt gedaan om te analyseren wat de eventuele impact is van een tweede lijn door het centrum.

### *3.3 Beveiliging strengelspoor*

Voor deze case is gekozen voor een strikte afhandeling van de voertuigen op het strengelspoor. Uitgangspunt van het Projectbureau is dat voertuigen alleen stil mogen staan bij haltes en niet in de winkelstraat om de vrijgave van het strengelspoor af te wachten. Vanaf de drie relevante haltes (Grote Markt, Oosterstraat, Zuiderdiep) kunnen trambestuurders elkaar niet zien, dus is gebruik gemaakt van seinen. Indien van beide kanten een tram zich aanmeldt, zal de eerste voorgaan, zonder prioriteitstoekenning per richting of lijn. De tweede tram wacht bij de halte, totdat het strengelspoor helemaal vrij is en krijgt dan toestemming middels een sein om te gaan rijden. Voor de reizigers is dit een gunstig uitgangspunt, omdat een wachtende tram altijd bij de halte blijft staan en reizigers die te laat waren alsnog kunnen instappen. Niets is vervelender dan de tram net missen en vervolgens constateren dat de tram enkele tientallen meters verderop stil blijft staan.





*Figuur 5: Screenshot van het model met strengelspoor van 125 meter.*

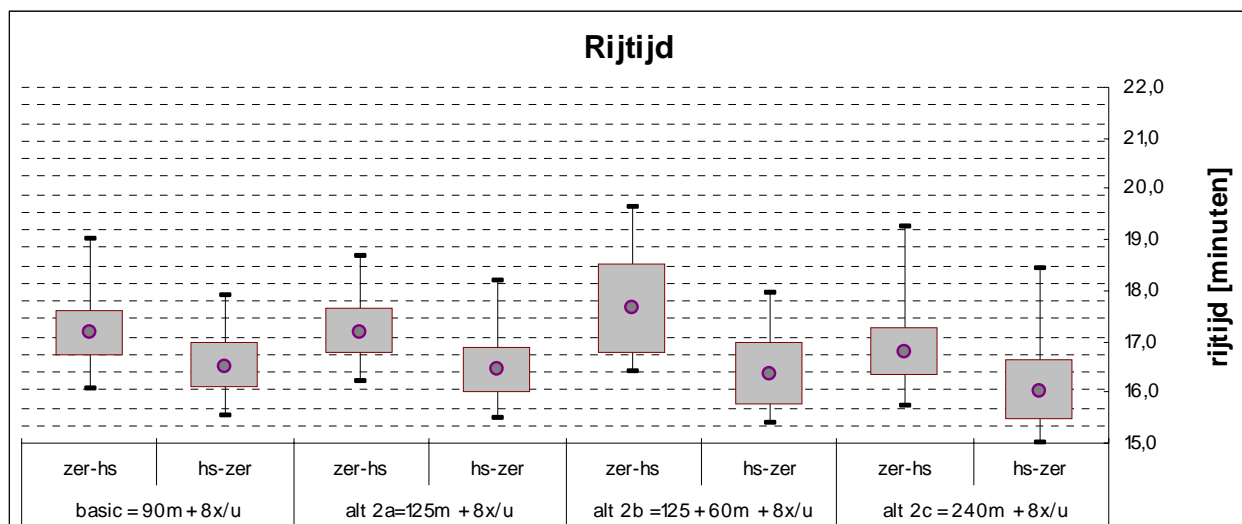
## **4. RESULTATEN**

### *4.1 Rijtijden*

De rijtijden van de gevraagde varianten verschillen weinig met de rijtijd van het basismodel. De rijtijd is gemeten tussen vertrek van een eindpunt tot aan de aankomst bij het andere eindpunt, respectievelijk Zernike en Hoofdstation. De rijtijden verschillen per richting ca. 0,5 minuut, wat met name veroorzaakt wordt door de keerlus bij het Hoofdstation. Een kleiner deel van het verschil kan worden verklaard uit de aannames van de wachttijden per richting op de kruisingen met VRI's. Gedurende de spitsperiodes (07:00-09:00 en 16:00-18:00) komt er per richting ca. 0,5 minuut rijtijd bij, wat met name wordt veroorzaakt door extra wachttijd op de kruisingen.

### *4.2 Frequentie 8x/uur*

Bij een frequentie van 8 voertuigen per uur per richting zijn de verschillen tussen het basismodel en de varianten minimaal. Het interval tussen de voertuigen is ca. 7,5 minuut, wat het goed mogelijk maakt om trams ongehinderd het strengelspoor te laten passeren. In figuur 6 worden de resultaten van het basismodel en de varianten bij een frequentie van 8x/uur getoond.



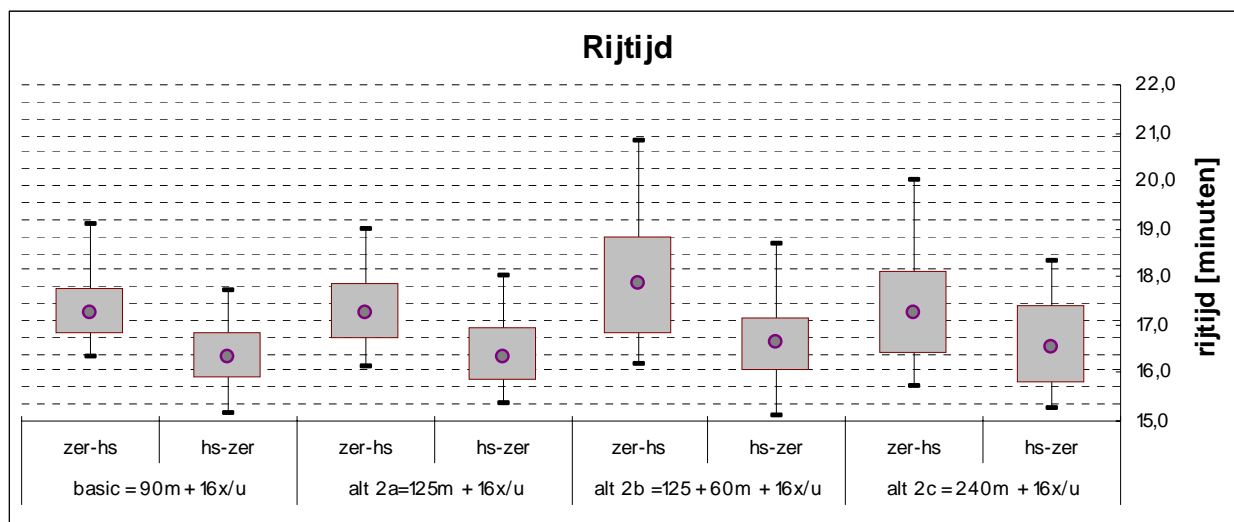
Figuur 6: Rijtijd per richting per variant met een frequentie van 8x/uur (weergegeven: minimum, 15-percentiel, gemiddelde, 85-percentiel en maximum)

In het basismodel en variant 1 hoeft geen van de trams te wachten voor het strengelspoor. Bij variant 2 moet richting Hoofdstation ca. 40% gemiddeld 1 minuut wachten met een spreiding van een 0,5 minuut. Richting Zernike moeten meer trams wachten (70%), maar ze wachten gemiddeld een halve minuut met een spreiding van 15 seconden.

Variant 3 lijkt de meest aantrekkelijke, aangezien de rijtijd gemiddeld het kortst is. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat in deze variant de Oosterstraat geen halte heeft, wat dus halteertijd scheelt ten opzichte van de andere varianten. Het halteren kost gemiddeld ongeveer 0,8 minuut, waarmee variant 3 dezelfde rijtijd zou hebben als het basismodel en variant 1. Bij variant 3 hoeft richting Hoofdstation niet gewacht te worden voor het strengelspoor, terwijl richting Zernike bijna 90% van de trams een halve minuut  $\pm$  10 seconden moet wachten. Dit wordt veroorzaakt doordat de tram richting Hoofdstation telkens eerder bij het strengelspoor aankomt dan de tram richting Zernike. (zie paragraaf over buffer).

#### 4.3 Frequentie 16x/uur

Bij een frequentie van 16 voertuigen per uur per richting nemen de verschillen tussen het basismodel en de varianten toe. Het interval tussen de voertuigen is ca. 3,25 minuut, wat zeker bij de langere varianten van het strengelspoor voor langere wachttijden zorgt. In onderstaande figuur worden de resultaten van het basismodel en de varianten bij een frequentie van 16x/uur getoond.



*Figuur 7: Rijtijd per richting per variant met een frequentie van 16x/uur (weergegeven: minimum, 15-percentiel, gemiddelde, 85-percentiel en maximum)*

Het basismodel en variant 1 hebben ongeveer dezelfde waarden als met een frequentie van 8x/uur, alleen zijn de spreiding en de maximale waarden iets groter. Bij allebei moeten in beide richtingen ca. 15% van de trams even wachten voor het strengelspoor. Richting Hoofdstation wordt ca. 15 seconden gewacht, richting Zernike ca. 25 seconden. Het verschil wordt veroorzaakt doordat een tram die vertrekt van halte Grote Markt richting Hoofdstation eerst nog over dubbelsporig deel rijdt, maar dan al wel het strengelspoor bezet moet melden om te voorkomen dat de tram stil komt te staan waar dat niet mag.

Bij de varianten 2 en 3 nemen de verschillen ten opzichte van de 8x/uur frequentie toe. Bij variant 2 moet in beide richtingen ca. 50% van de trams wachten totdat het strengelspoor vrij is. Bij variant 3 moet richting Hoofdstation 50% wachten en richting Zernike 90%.

#### 4.4 Buffer bij Hoofdstation

Om de toegevoegde waarde van een korte buffertijd op het Hoofdstation te onderzoeken is variant 3 met een frequentie van 16x/uur onderzocht met en zonder buffer. In 4.2 zijn de resultaten gepresenteerd met buffer. Zonder buffer neemt de rijtijd toe tot 35 minuten  $\pm$  6%. In de richting van het Hoofdstation moet nu 80% van de voertuigen wachten, terug richting Zernike nog steeds 90%.

De tijd van vertrek bij Zernike tot aan de aankomst bij Zernike is met buffer 33,8 minuten rijtijd plus ca. 1 minuut buffertijd op het Hoofdstation. Zonder buffer is de rijtijd gemiddeld 35 minuten met een iets grotere spreiding dan de variant met buffer. Afgaande op de vergelijking tussen de omlooptijden is er weinig verschil. Met buffer heeft een tram gemiddeld een kortere rijtijd maar een langere halteer c.q. buffertijd op het Hoofdstation. Zonder buffer heeft een voertuig gemiddeld een iets langere rijtijd, maar een kortere halteertijd op het Hoofdstation. Vanuit de reiziger gezien is de variant met buffer te verkiezen. Deze variant biedt de reiziger namelijk een grotere kans om de tram op het Hoofdstation te halen, er is een betere afstemming met de treinen mogelijk, de rijtijd is korter en door een kleinere spreiding eveneens betrouwbaarder.

#### 4.5 Conclusie

Het Projectbureau wil voor de exploitatie van de lijn van het Hoofdstation naar Zernike gebruikmaken van 6 voertuigen met een frequentie van 8x/uur. Het interval is derhalve 7,5 minuut, waardoor de maximale omlooptijd  $6 \times 7,5 = 45$  minuten is. De omlooptijd is de tijd tussen vertrek op eindpunt Zernike van rit  $n$  tot aan tijd van vertrek van rit  $n + 1$  op eindpunt Zernike. Anders gezegd, de omlooptijd is de rijtijd van Zernike naar Hoofdstation en v.v. + keertijd + buffertijd op Zernike.

Tabel 1: Berekening voor gemiddelde rijtijd per richting

45	Maximale omlooptijd
4,5	10% buffertijd
2,5	Minimale keertijd op Zernike
2,0	Halteer- en buffertijd op Hoofdstation
9	Tijd op eindpunten
36	Maximale rijtijd van Hoofdstation – Zernike en v.v.
18	Gemiddelde rijtijd per richting

Bij Zernike wordt de buffertijd berekend door 10% van de rijtijd + keertijd te nemen. Bij een omlooptijd van 45 minuten is dit dus 4,5 minuut. De keertijd is gebonden aan een minimale technische keertijd, die bestaat uit het afsluiten van de bestuurderscabine, het lopen naar het andere einde van de tram en het opstarten van de bestuurderscabine voor de nieuwe rijrichting. Voor zowel het afsluiten als het opstarten van de bestuurderscabine kan 60 seconden worden aangenomen. De looptijd tussen beide cabines bedraagt ongeveer 30 seconden (bij een loopsnelheid van 5 km/u over 40 meter voertuiglengte). De totale minimale keertijd komt hiermee op 2,5 minuten. Dit is langer dan de duur van het in/uitstappen van de passagiers en is daarmee maatgevend voor de totale minimale keertijd. De halteer- en buffertijd op het Hoofdstation is ca. 2 minuten. Voor de maximale rijtijd blijft totaal 36 minuten over.

Van alle onderzochte varianten valt de rijtijd binnen deze 36 minuten. Ook de spreiding (de 15- en 85-percentiel waarden) blijven onder deze grens, alleen variant 2 met een frequentie van 16x/uur heeft als 85-percentiel waarde precies 36 minuten. De maximale waarden van de varianten komen echter wel boven de 36 minuten (tot 39,5 minuut). Hiervoor kan de buffertijd op Zernike gehanteerd worden om deze uitschieters weer af te stemmen op de dienstregeling. Het Projectbureau zal moeten besluiten of de 85-percentiel waarden acceptabel zijn of dat men wil kiezen voor een nog robuuster systeem met 90 of 95-percentiel waarden.

In dit onderzoek is gekozen voor een zeer veilige afhandeling van het strengelspoor (zie 3.2), waardoor relatief lange wachttijden ontstaan voor de trams. Een goede optie is om een minder strikt regime te hanteren, waarbij trams al vertrekken bij de halte als de tegemoetkomende tram nog op het strengelspoor is. Met name bij lange stukken dubbelspoor tussen de halte en het strengelspoor kan dit tot tijds winst leiden. Hierdoor kan het mogelijk zijn om alle varianten binnen de gewenste rijtijd te krijgen.

## 5. CONCLUSIES

Het analyseren van de exploitatie is een belangrijk onderdeel tijdens het ontwerpproces van de infrastructuur. Dit paper laat zien dat met behulp van de HRS op een eenvoudige manier diverse varianten van de infrastructuur getest kunnen worden op hun effect op de exploitatie. Ontwerptekeningen voor de verschillende varianten kunnen ingevoerd

worden als input voor een simulatiemodel, wat vervolgens in relatief korte tijd de impact laat zien. De uitvoer (tabellen, grafieken, filmpjes) maakt het mogelijk om over de verschillende alternatieven goed te communiceren en de voor- en nadelen goed af te wegen. Het gebruik van simulatie kan eveneens van pas komen in politieke besluitvorming. Vooraf zijn ontwerpkeuze met betrekking tot de infrastructuur soms onbegrijpelijk voor betrokken partijen, terwijl middels een animatie consequenties duidelijk gemaakt kunnen worden, waardoor wederzijds begrip en consensus kan ontstaan.

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met HTM Personenvervoer, TU Delft en het Projectbureau Regiotram. Zie voor meer informatie over de case [www.regiotram.nl](http://www.regiotram.nl)

## REFERENTIES

1. Avelino F.R., M.C.G. te Brommelstroet, G. Hulster, The Politics of Timetable Planning: Comparing the Dutch to the Swiss, CVS 2006
2. Boterman, J.W. en N. van Oort, Sneller reizen door langer stilstaan, Bundeling van bijdragen aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk, Santpoort, 2009
3. Ceder, A., Advanced modeling for transit operations and service planning, Chapter Public Transport Timetabling and Vehicle Scheduling, Elsevier Science, pp. 31–57, 2003.
4. Derek Szw-Ming Lee, Understanding capacity and performance of urban rail transit terminals, Massachusetts Institute of Technology, 2002
5. Govers, B., J. Banninga en A. Mulders (Goudappel Coffeng), Vervoerwaardestudie RegioTram, Groningen, 2008
6. Jacobs, P. H. M., The DSOL Simulation Suite: Enabling Multi-formalism Simulation in a Distributed Context, Delft, 2005
7. Kanacilo, E. M. and A. Verbraeck, Simulation services to support the control design of rail infrastructures, Winter Simulation Conference: 1372-1379., 2005
8. Kanacilo, E. M. and A. Verbraeck, Supporting intelligent control design of rail infrastructures, Delft, 2005
9. Lee, D.S.M. and N.H.M. Wilson. Understanding Capacity and Performance of Urban Rail Transit Terminals, Master's thesis, MIT, Boston, 2002.
10. Medeossi, G. , D. Huerlimann, G. Longo, "Stochastic micro-simulation as a timetable robustness estimation tool", International Seminar on Railway Research, RailZürich 2009

11. Muller Th.H.J. and P.G. Furth, Integrating bus service planning with analysis, operational control and performance monitoring, ITS 10th conference proceedings, Washington, D.C., 2000.
12. Oort N. van, R. van Nes, Controlling operations of public transport to improve reliability: theory and practice, in: 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2009
13. Oort, N. van en R. van Nes, Eindpunten als beginpunt voor een betrouwbaar OV, CVS 2009
14. Pangilinan, C. Bus supervision deployment strategies and the use of Real-Time AVL for improved bus service reliability. Presented at 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2008.
15. Projectbureau RegioTram, Sporen naar de toekomst - tram en trein in de regio Groningen-Assen, Groningen, 2009
16. Vescovacci, M.A. and N.H.M. Wilson. Junction Capacity and Performance in Rail Transit. Master's Thesis, MIT, Boston, 2003.
17. Vromans M.J.C.M., Reliability of Railway Systems, PhD Thesis, Rotterdam, 2005
18. Yuan, J., I.A. Hansen, "Optimizing capacity utilization of stations by forecasting knock-on delays", International Seminar on Railway Research, RailDelft 2005