

# Een kwestie van kiezen

Een nieuw hiaatacceptatiemodel voor links afslaan op een T-kruising met behulp van simulatie om verkeersveiligheid beter in te schatten



Tim van Dijck  
Afstudeeronderzoek Civiele Techniek, Universiteit Twente  
Mei 2008



## Titelblad

Titel: Een kwestie van kiezen  
Ondertitel: Een nieuw hiaatacceptatiemodel voor links afslaan op een T-kruising met behulp van simulatie om verkeersveiligheid beter in te schatten

Afstudeeronderzoek ter afronding van de studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente

Auteur: Tim van Dijck  
Studentnummer : 0008087

Datum: 14 mei 2008  
Locatie: Leidschendam

### Afstudeercommissie

prof. dr. ir. B. van Arem (afstudeerdocent Universiteit Twente)  
drs. T.W. Schaap (begeleider Universiteit Twente)  
ir. P.L.J. Morsink (begeleider Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid)

Programmatuur en begeleiding vanuit TNO Monitoring Systems  
dr. ir. B. Netten

Afstudeeronderzoek uitgevoerd bij:  
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid  
Duindoorn 32  
Postbus 1090  
2260 BB Leidschendam  
070 - 3173 333



In samenwerking met:  
TNO Industrie en Techniek  
Monitoring Systems  
Stieltjesweg 1  
Postbus 155  
2600 AD Delft



Universiteit Twente  
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen  
Civiele Techniek, Afdeling Verkeer, Vervoer en Ruimte  
Kenniscentrum Applications of Integrated Driver Assistance  
Postbus 217  
7500 AE Enschede  
053-4894322





## Voorwoord

---

Een kwestie van kiezen, soms makkelijker gezegd dan gedaan. Er zijn keuzes die vanzelf lijken te gaan en andere keuzes vergen heel wat hoofdbrekens. Het leven is een aaneenrijging van keuzes die je zelf en samen maakt.

Dit afstudeerrapport draait om de keuze die een bestuurder maakt bij het oversteken van een kruising. Het rapport is ter afronding van mijn studie Civiele Techniek en Management aan de Universiteit Twente met de specialisatie Verkeer, Vervoer en Ruimte. Het onderzoek is van juni 2007 tot april 2008 uitgevoerd bij de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV) in Leidschendam in samenwerking met TNO Monitoring Systems in Delft.

Het afstuderen is af en toe een worsteling geweest met vele keuzemomenten en momenten van onzekerheid. Deze heb ik weten te overwinnen en daarbij hebben een aantal personen een belangrijke rol gespeeld.

Graag wil ik mijn afstudeerdocent Bart van Arem bedanken voor de begeleiding, praktische adviezen en nieuwe ideeën gedurende het hele traject. Menig afstudeerdipje in de afgelopen maanden heb ik dankzij Nina Schaap, mijn dagelijkse begeleidster vanuit de universiteit, overwonnen. Mede door haar motivatie en haar inhoudelijke adviezen heb ik dit resultaat bereikt. Vanuit de SWOV heeft Peter Morsink mij de mogelijkheid gegeven om deze afstudeeropdracht in mijn eigen tempo uit te voeren. Bedankt voor de adviezen, input en discussies.

Een deel van mijn afstudeeronderzoek heb ik uitgevoerd bij TNO Monitoring Systems in Delft. Het nieuwe hiaatacceptatiemodel is door Bart Netten geprogrammeerd in de simulatieomgeving MARS. Ik wil hem bedanken voor al zijn werk en de goede en intensieve samenwerking. Menige avonden zijn er in het model gaan zitten. Mijn collega's bij de SWOV en TNO hebben voor een leuke tijd gezorgd.

Marja en Joost, zonder jullie ouderlijke steun, vertrouwen en hulp was het studeren een heel stuk lastiger geweest. De sparsessies met Joost hebben mij op koers gehouden richting mijn einddoel.

Karla, ondanks de soms grote afstand ben je altijd dicht bij mij.

Tim van Dijck  
14 mei 2008  
's Gravenhage

## Korte samenvatting

---

Het onderzoek behandelt een nieuw simulatiemodel voor links afslaan op een T-kruising. Dit simulatiemodel heeft als doel om verkeersveiligheid nauwkeuriger in te kunnen schatten. De beslissing van een bestuurder tot het kruisen van en invoegen in een verkeersstroom wordt door een hiaatacceptatiemodel gemodelleerd. Op basis van literatuuronderzoek is een nieuw model met meerdere hiaten in de beslissing opgesteld en geïmplementeerd in de simulatieomgeving MARS (Multi-Agent Real-time Simulator) van TNO. Simulaties geven aan dat het nieuwe hiaatacceptatiemodel de verkeersveiligheid hoger inschat ten opzichte van het bestaande model en de verkeersafwikkeling nauwelijks verandert. De beslissing van de bestuurder in het nieuwe model is realistischer gemodelleerd, omdat de bestuurder de verkeersstroom mee neemt in zijn beslissing. Validatie van het model aan data uit de werkelijkheid is een vervolgstap.

## Samenvatting

---

Advanced Driver Assistance (ADA) systemen als advanced cruise control en blind-spot detectie beginnen beschikbaar te komen in middenklasse personenauto's. Nieuwe bestuurdersondersteunende systemen om de veiligheid op kruisingen te verhogen staan aan het begin van de ontwikkelingsfase. Voorafgaand aan de daadwerkelijke toepassing van deze systemen wil men de effecten op bestuurdersgedrag, verkeersveiligheid en doorstroming onderzoeken.

Eén van de onderzoeksinstrumenten om de effecten op verkeersveiligheid en doorstroming te bepalen is een verkeerskundig microsimulatiemodel. In een microsimulatiemodel wordt het verkeer op voertuigniveau gesimuleerd. Het gedrag van deze voertuigen in een model is vaak een combinatie van het gedrag van voertuig en bestuurder. Het gedrag van een voertuig-bestuurder-combinatie is onderverdeeld in sub-gedragsmodellen. De beslissing om een kruising over te steken wordt in het hiaatacceptatiemodel gemaakt. Een hiaat is de tijd tussen twee opeenvolgende voertuigen.

Om met een microsimulatiemodel uitspraken te kunnen doen over de verkeersveiligheidseffecten van nieuwe ADA-systemen moet het bestuurdersgedrag op kruisingen realistischer worden gemodelleerd. Dit onderzoek wil een bijdrage leveren aan het realistisch weergeven van het bestuurdersgedrag op een T-kruising in microsimulatiemodellen. De doelstelling van dit onderzoek is het ontwikkelen van een realistisch hiaatacceptatiemodel voor links afslaan op een T-kruising in een simulatieomgeving, zodat verkeersveiligheidseffecten nauwkeuriger met microsimulatiemodellen kunnen worden ingeschat. Onder een realistisch hiaatacceptatiemodel wordt verstaan dat de modellering van de beslissing van een bestuurder is gebaseerd op de waarneembare werkelijkheid. Dit wordt gerealiseerd door in het model meer factoren mee te nemen die invloed hebben op de beslissing van een links afslaande bestuurder.

Het hiaatacceptatiemodel is uitgewerkt voor een links afslaande bestuurder vanuit een nevenweg naar een hoofdweg in een STOP-situatie. Aan de basis van het hiaatacceptatiemodel ligt het begrip kritiek hiaat, wat als drempel dient om een hiaat in de verkeersstroom te accepteren of te weigeren. Dit kritiek hiaat verschilt per bestuurder en situatie. Een kansverdeling is gekozen om de invloeden op het kritieke hiaat weer te geven.

In het nieuwe hiaatacceptatiemodel worden meerdere hiaten in de verkeersstroom geëvalueerd in de beslissing van de bestuurder. Het bestaande hiaatacceptatiemodel neemt alleen het eerste hiaat mee in de beslissing. Het nieuwe model kan vier hiaten meenemen in de beslissing en op basis van de positie van elk hiaat wordt een wegingsfactor gehanteerd.

Verkeersveiligheidseffecten in microsimulatiemodellen kunnen door middel van conflicten worden ingeschat als de voertuigposities en snelheden correct door het simulatiemodel worden berekend. Conflicten zijn bijna-ongevallen. De ernst van een conflict kan worden bepaald door afgeleide veiligheidsindicatoren. In dit onderzoek zijn de afgeleide veiligheidsindicatoren time-to-collision (TTC)

en post-encroachment-time (PET) gebruikt. Een minimale TTC- of PET-waarde onder de 1,5 seconden is gedefinieerd als een conflict.

Het nieuwe en bestaande hiaatacceptatiemodel is geïmplementeerd in de simulatieomgeving Multi-Agent Real-time Simulator (MARS) van TNO. Naast het hiaatacceptatiegedrag is het ook noodzakelijk geweest om het beslissingsmoment en de acceleratie van de bestuurder te modelleren. Het verkeer op de hoofdweg is door middel van een voertuigvolgmodel en een voertuigvolgtijdverdeling gemodelleerd.

Simulaties zijn uitgevoerd met het nieuwe hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing en het bestaande model met één hiaat in de beslissing. De verkeersveiligheid is vergeleken door middel van het aantal conflicten te registreren. De verkeersafwikkeling van het model is vergeleken door middel van de wachttijd van de links afslaande bestuurder.

Resultaten laten zien dat het aantal conflicten daalt naarmate meer hiaten in de beslissing worden meegenomen. De gemiddelde wachttijden verschillen nauwelijks tussen het nieuwe en het bestaande model. Het nieuwe model heeft als effect dat sommige hiaten worden geweigerd, omdat een aantrekkelijker hiaat volgt. Dit is een vooraf verwacht effect. Een ander effect is de acceptatie van een aantal hiaten dat in het bestaande model werd geweigerd. Het laatstgenoemde effect is niet van te voren verwacht.

Het nieuwe hiaatacceptatiemodel is realistischer doordat nu de verkeersstroom wordt meegenomen in de beslissing van de bestuurder in plaats van alleen het eerste hiaat. Het nieuwe hiaatacceptatiemodel schat de verkeersveiligheid hoger in en de verkeersafwikkeling verschilt nauwelijks ten opzichte van het bestaande model.

De implementatie van het hiaatacceptatiemodel en het overige rijgedrag van de bestuurder en hoofdstroombestuurders moeten worden getoetst aan het rijgedrag uit de werkelijkheid. Dan pas kunnen uitspraken worden gedaan of het nieuwe hiaatacceptatiemodel meer overeen komt met de werkelijkheid en verkeersveiligheidseffecten nauwkeuriger kunnen worden ingeschat.

Op basis van dit onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan.

- Het geïmplementeerde bestuurdersgedrag moet gecalibreerd en gevalideerd worden met data en rijgedrag uit de werkelijkheid.
- Het bestuurdersgedrag van de voertuigen op de hoofdweg moet op een meer realistische wijze worden weergegeven door een voertuigvolgmodel dat rekening houdt met het gedrag van kruisend verkeer.
- De simulatieomgeving MARS dient verder ontwikkeld te worden om de omgeving te gebruiken in het evalueren van verkeersveiligheidseffecten.



- Het is nodig om het hiaatacceptatiemodel uit te breiden voor meerdere typen kruisingen en manoeuvres, zoals andere voorrangsregelingen en rechts afslaan.
- Een volgende stap naar realistisch bestuurdersgedrag bestaat uit het meenemen van inschattingfouten die bestuurders in werkelijkheid maken.
- Om de verkeersveiligheidseffecten van ADA-systemen daadwerkelijk te kunnen onderzoeken in een simulatieomgeving is een correcte implementatie van het rijgedrag met een ADA-systemen in het model nodig. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met de mogelijke effecten van de systemen op korte en lange termijn op het rijgedrag van de bestuurder.

## Summary

---

Advanced Driver Assistance (ADA) systems, such as advanced cruise control, are becoming increasingly available in mid-sized cars. New assistance systems for intersections are in the first stages of development. Impact assessment on traffic safety and flow of these systems is necessary before they are implemented.

Microscopic traffic simulation models can assess traffic flow impacts and look promising to assess traffic safety impacts. They simulate each vehicle in a traffic network. Driving behaviour of a vehicle consists of behaviour of a driver and vehicle together and is modelled by sub behaviour models. The decision to cross an intersection is modelled in a gap acceptance model.

This research intends to contribute to a realistic model of driving behaviour on a T-intersection in a microscopic simulation model. The aim of this research is to develop a realistic gap acceptance model for drivers turning left on a T-intersection in a simulation model, to assess traffic safety impacts more accurately. A realistic gap acceptance model comprehends the modelling of the drive decision based on the observable reality. This is achieved by including more influencing factors in the decision model of drivers turning left.

The gap acceptance model is developed for drivers turning left from a minor road in to a main road on a STOP-controlled T-intersection. The minimum gap length in the major traffic stream that a driver is willing to accept is called the critical gap. This differs between drivers. A distribution of the critical gap includes these variations between drivers.

The new gap acceptance model compares multiple gaps in the traffic stream against the critical gap, rather than only the first gap, as done in the current model. Four gaps are included in the decision of the driver and based on the position of the gaps in the traffic stream weighting factors are used.

Traffic safety effects can be assessed by using conflicts in microscopic simulation models. A conflict is defined as a near accident. The severity of a conflict is measured by surrogate safety measures like time-to-collision (TTC) and post-encroachment-time (PET). In this thesis a conflict is defined when the minimal TTC or a PET is 1,5 seconds or less. Detailed positions and velocities of vehicles are needed to compute these conflicts accurately.

The new gap acceptance model is implemented in the simulation environment called Multi-Agent Real-time Simulator (MARS) which is developed by TNO. It was required to implement sub behaviour models like decision time and acceleration of the drivers turning apart from the gap acceptance model. Traffic on the main road is implemented by a car following model and a headway distribution between cars.

Simulations are carried out to investigate the differences between the new gap acceptance model (with multiple gaps in the decision) and the current model (with one gap in the decision). Conflicts by means of the surrogate safety measures are used to measure traffic safety. Waiting time of the driver turning left is used to measure traffic throughput of the T-intersection.

Results indicate that the number of conflicts decreases as more gaps are included in the decision of the driver turning left. The mean waiting time differs slightly between the new and the current model. Two effects are recorded with multiple gaps in the decision. First, some gaps are rejected because a more favourable one is in the traffic stream behind it. This effect was intended. Second, a few gaps are accepted in the new model, that were rejected with the current model. This effect was not foreseen.

The new gap acceptance model includes a part of the traffic stream in the decision of the driver. This concept is more realistic than the current model with only one gap in the decision. The new model assesses traffic safety higher and traffic throughput differs slightly.

The new gap acceptance model and the other driver behaviour models implemented in this research should be validated with real, detailed driving behaviour data. Only then it will be possible to claim whether the new gap acceptance model and driver behaviour in the simulation environment is realistic and if the traffic safety effects are computed more accurately.

Further research to improve driving behaviour in microscopic simulation models should incorporate the following recommendations.

- A next step is the calibration and validation of the implemented models with real detailed traffic data and conflict data.
- The car following model of the main road drivers should be extended with an improved reaction on crossing traffic.
- The new gap acceptance model should be extended for other types of intersections and other manoeuvres like a right turn and 4-way intersection.
- A next step in realistic driving behaviour is incorporation of misjudgements and mistakes made by drivers.
- The development of the simulation environment MARS must be continued to use the simulation environment in future traffic safety impact assessment studies on intersections.
- To assess traffic safety effects of ADA-systems, the systems should be modelled correctly and the adapted driving behaviour as well. Short term and long term effects of ADA-systems on driving behaviour should be taken into account.

## Lijst van begrippen en afkortingen

|                        |                                                                                                                                                  |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADA-systeem            | Advanced Driver Assistance systeem                                                                                                               |
| Bestuurder             | Onder de bestuurder wordt de bestuurder verstaan van het voertuig dat links afslaat van de nevenstroom naar de verkeersstroom op een T-kruising. |
| Hoofdstroom van rechts | De stroom voertuigen op de hoofdweg van rechts waarin de bestuurder in moet voegen.                                                              |
| Hoofdstroom van links  | De stroom voertuigen op de hoofdweg van links die de bestuurder moet kruisen.                                                                    |
| Nevenstroom            | De stroom voertuigen waar de bestuurder start op de T-kruising.                                                                                  |
| Verkeersstroom         | De combinatie van de twee hoofdstromen                                                                                                           |
| MARS                   | Multi-Agent Real-time Simulator                                                                                                                  |
| PET                    | Post-encroachment-time                                                                                                                           |
| TTC                    | Time-to-collision                                                                                                                                |

# Inhoudsopgave

---

|                                                                                |             |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Voorwoord.....</b>                                                          | <b>i</b>    |
| <b>Korte samenvatting .....</b>                                                | <b>ii</b>   |
| <b>Samenvatting .....</b>                                                      | <b>iii</b>  |
| <b>Summary .....</b>                                                           | <b>vi</b>   |
| <b>Lijst van begrippen en afkortingen.....</b>                                 | <b>viii</b> |
| <b>Hoofdstuk 1 Inleiding.....</b>                                              | <b>1</b>    |
| 1.1 Probleemkader .....                                                        | 1           |
| 1.2 Doelstelling .....                                                         | 3           |
| 1.3 Onderzoeksvragen .....                                                     | 4           |
| 1.4 Definities .....                                                           | 5           |
| 1.5 Afbakening van het onderzoek.....                                          | 5           |
| 1.6 Onderzoeksmethode .....                                                    | 6           |
| 1.7 Leeswijzer.....                                                            | 6           |
| <b>Hoofdstuk 2 Het hiaatacceptatiemodel .....</b>                              | <b>7</b>    |
| 2.1 Het bestaande hiaatacceptatiemodel.....                                    | 7           |
| 2.2 Invloedsfactoren op de hiaatacceptatie.....                                | 8           |
| 2.3 Uitwerking van de invloedsfactoren op de hiaatacceptatie .....             | 12          |
| 2.4 Interactie tussen de invloedsfactoren.....                                 | 16          |
| 2.5 Conclusies .....                                                           | 17          |
| <b>Hoofdstuk 3 Verkeersveiligheidseffecten in microsimulatiemodellen .....</b> | <b>18</b>   |
| 3.1 Verkeersveiligheidseffecten en de conflicttheorie .....                    | 18          |
| 3.2 Conflicten en afgeleide veiligheidsindicatoren .....                       | 19          |
| 3.3 Afgeleide veiligheidsindicatoren in microsimulatiemodellen .....           | 20          |
| 3.4 Hiaatacceptatie in microsimulatiemodellen .....                            | 20          |
| 3.5 Keuze van de simulatieomgeving MARS .....                                  | 21          |
| 3.6 Conclusies .....                                                           | 23          |
| <b>Hoofdstuk 4 Het conceptuele model .....</b>                                 | <b>24</b>   |
| 4.1 De bepaling van het kritiek hiaat .....                                    | 24          |

|                    |                                                                                      |           |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2                | <i>Uitwerking van meerdere hiaten in de beslissing</i> .....                         | 25        |
| 4.3                | <i>Conclusies</i> .....                                                              | 28        |
| <b>Hoofdstuk 5</b> | <b>Implementatie van het conceptuele model</b> .....                                 | <b>29</b> |
| 5.1                | <i>Afgeleide veiligheidsindicatoren en wachttijd als vergelijkingscriteria</i> ..... | 29        |
| 5.2                | <i>Verkeerssituatie op de T-kruising</i> .....                                       | 29        |
| 5.3                | <i>Aannames in het hiaatacceptatiemodel</i> .....                                    | 30        |
| 5.4                | <i>Aannames in het rijgedrag van de bestuurder</i> .....                             | 31        |
| 5.5                | <i>Aannames in het verkeer in de hoofdstromen</i> .....                              | 35        |
| 5.6                | <i>Statediagram</i> .....                                                            | 38        |
| 5.7                | <i>Invoer en uitvoer van het simulatiemodel</i> .....                                | 39        |
| 5.8                | <i>Conclusies</i> .....                                                              | 40        |
| <b>Hoofdstuk 6</b> | <b>Simulaties</b> .....                                                              | <b>41</b> |
| 6.1                | <i>Instellingen van de experimenten</i> .....                                        | 41        |
| 6.2                | <i>Resultaten van de simulaties</i> .....                                            | 46        |
| 6.3                | <i>Discussie van de resultaten</i> .....                                             | 51        |
| 6.4                | <i>Conclusies</i> .....                                                              | 57        |
| <b>Hoofdstuk 7</b> | <b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....                                             | <b>58</b> |
| 7.1                | <i>Beantwoording van de onderzoeksvragen</i> .....                                   | 58        |
| 7.2                | <i>Conclusies</i> .....                                                              | 60        |
| 7.3                | <i>Aanbevelingen</i> .....                                                           | 61        |
| <b>Referenties</b> | .....                                                                                | <b>63</b> |
| <b>Bijlage A</b>   | <b>Implementatie Erlang-2 verdeling in Excel</b> .....                               | <b>66</b> |
| <b>Bijlage B</b>   | <b>Statediagram en functies</b> .....                                                | <b>68</b> |
| <b>Bijlage C</b>   | <b>Invoer van het simulatiemodel</b> .....                                           | <b>74</b> |
| <b>Bijlage D</b>   | <b>Uitvoer van het simulatiemodel</b> .....                                          | <b>78</b> |
| <b>Bijlage E</b>   | <b>Berekening van de afgeleide veiligheidsindicatoren</b> .....                      | <b>79</b> |
| <b>Bijlage F</b>   | <b>Statistische toetsing</b> .....                                                   | <b>82</b> |

## **1.1 Probleemkader**

Intelligente voertuigsystemen als advanced cruise control en blind-spot detectie zijn op dit moment steeds vaker beschikbaar in nieuwe personenvoertuigen. Nieuwe Advanced Driver Assistance (ADA) systemen zijn in ontwikkeling. Daarbij kan worden gedacht aan een systeem dat de bestuurder ondersteunt bij het oversteken van een kruising. Vooraf aan de invoering van deze nieuwe systemen wil men zo goed mogelijk de effecten op de doorstroming van het verkeer, de bestuurder, de leefomgeving en ook de verkeersveiligheid inschatten. Met behulp van een rij simulator kan bijvoorbeeld de reactie van bestuurders op een bepaald nieuw systeem worden onderzocht. Voor de effecten op de verkeersveiligheid en de doorstroming is de invloed van de systemen op netwerkniveau van belang.

Uiteindelijk is het doel om met behulp van een microsimulatiemodel uitspraken te kunnen doen over de effecten van een ADA-systemen in de werkelijkheid. De effecten gemeten in de modelomgeving moeten op een correcte wijze inzicht geven in de effecten die in de werkelijkheid optreden. Om dit te kunnen doen moet het verkeersgedrag en de invloed van de ADA-systemen op een goede manier worden gemodelleerd. Het verkeersgedrag zonder een ADA-systeem moet ook op een goede manier zijn gemodelleerd.

### **Microsimulatiemodel**

In een microsimulatiemodel wordt het verkeer op voertuigniveau in een netwerk gesimuleerd. De voertuigen in de simulatie zijn meestal een combinatie van het voertuig en bestuurder. Het rijgedrag van deze voertuig-bestuurdercombinaties in het model wordt bepaald door sub-gedragsmodellen die rekening moeten houden met de bestuurder en het type voertuig. Meestal zijn de volgende sub-gedragsmodellen aanwezig: een voertuigvolgmodel, een routekeuzemodel, een rijstrookwisselmodel en een hiaatacceptatiemodel.

Een aantal microsimulatiemodellen is beschikbaar en daarmee is veel ervaring opgedaan met effectbepaling van infrastructurele maatregelen op de doorstroming, bijvoorbeeld de effecten van een nieuwe verkeersregelinstallatie of een nieuwe weg. De ervaring om met microsimulatiemodellen verkeersveiligheid in te schatten is op dit moment nog niet groot.

In een microsimulatiemodel kunnen namelijk door de geïmplementeerde algoritmes (nog) geen ongevallen gesimuleerd worden. Daarmee kan de traditionele maat voor verkeersveiligheid, het aantal ongevallen per tijdseenheid, niet gebruikt worden.

## Conflicttheorie

Een alternatieve methode is noodzakelijk om de verkeersveiligheidseffecten met een microsimulatiemodel te kunnen bepalen. De conflicttheorie gebaseerd op bijna-ongevallen kan gebruikt worden in microsimulatiemodellen. In de afgelopen jaren zijn conflicten in diverse studies met microsimulatiemodellen gebruikt als maat voor de verkeersveiligheid (o.a. Minderhoud en Bovy, 2001; Gettman en Head, 2003; Archer, 2005).

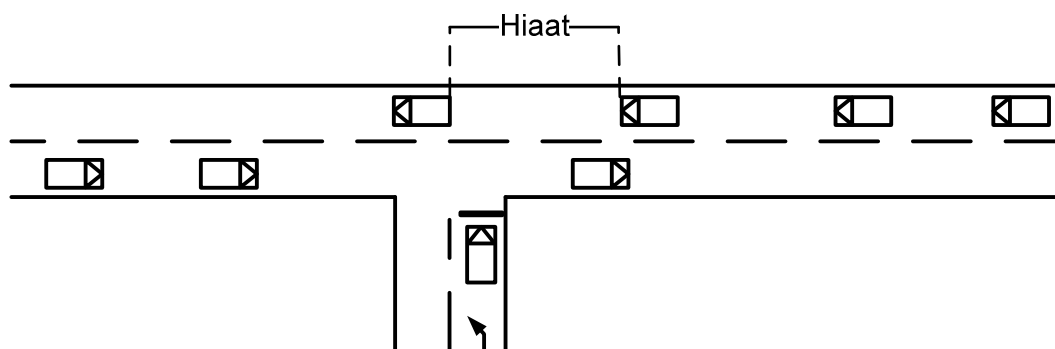
In de conflicttheorie wordt de ernst van een conflict beschreven met behulp van afgeleide veiligheidsindicatoren. Deze indicatoren worden afgeleid aan de hand van posities en snelheden van individuele voertuigen. De exacte posities en snelheden van elk voertuig moeten dan ook correct worden weergegeven door het microsimulatiemodel. Dit vraagt om een meer gedetailleerd bestuurdersgedrag in de modellen dan nu het geval is (Gettman en Pu, 2006). De microsimulatiemodellen worden op dit moment vooral gebruikt om de verkeersafwikkeling te modelleren waarbij geaggregeerde uitvoer wordt gehanteerd. Dit stelt minder zware eisen aan de exactheid van de posities van de voertuigen dan afgeleide veiligheidsindicatoren nodig hebben om een goed beeld te geven van de verkeersveiligheid.

## Verkeersveiligheid op kruispunten

Op kruispunten komen bijna alle handelingen die een bestuurder in het verkeer moet uitvoeren bijeen. De rijtaak op een kruispunt is daarmee zeer complex en er bestaat een grote mate van verkeersonveiligheid op kruispunten (Janssen, 2004). Op een kruising is de links afslaan beweging de meest risicovolle manoeuvre (Drolenga, 2005). In dit onderzoek staat de beslissing van bestuurders centraal die vanuit een nevenstroom links afslaan op een T-kruising, zie figuur 1-1.

## Oversteken van een kruispunt in microsimulatiemodel

Het besluit om een kruispunt over te steken wordt in microsimulatiemodellen in het sub-gedragsmodel 'hiaatacceptatie' genomen. Een hiaat is de tijd tussen twee voertuigen, zie figuur 1-1. In het model evalueert een bestuurder of het hiaat in de verkeersstroom groot genoeg om links af te slaan.



Figuur 1-1 Hiaatacceptatie

In een studie naar de mogelijkheden van microsimulatiemodellen AIMSUN, VISSIM en Q-PARAMICS om individueel bestuurdersgedrag te representeren concludeert Hidas (2005) dat in de



hiaatacceptatiemodellen meer mogelijkheden moeten zijn om de verschillen tussen bestuurders te onderscheiden in de beslissing om een kruising over te steken.

Om met afgeleide veiligheidsindicatoren de verkeersveiligheid in te schatten is het noodzakelijk te beschikken over exacte voertuigposities en snelheden. Om dit te bereiken moet het hiaatacceptatiegedrag als onderdeel van het bestuurdersgedrag op kruisingen gedetailleerd en met voldoende variatie in het bestuurdersgedrag worden gemodelleerd. Er kan bijvoorbeeld meer onderscheid worden gemaakt in bestuurdersgroepen en de wijze waarop bestuurders de beslissing nemen om een kruising over te steken.

## **1.2 Doelstelling**

Dit onderzoek wil een bijdrage leveren aan het realistisch weergeven van het bestuurdersgedrag zonder ADA-systeem op een T-kruising in microsimulatiemodellen, waardoor verkeersveiligheidseffecten nauwkeuriger met microsimulatiemodellen kunnen worden ingeschat. Eén van de mogelijkheden is het uitbreiden van de factoren die invloed hebben op de beslissing om links af te slaan en de manier waarop bestuurders de beslissing nemen om de T-kruising over te steken.

De doelstelling van dit onderzoek is als volgt:

*Het ontwikkelen van een realistisch hiaatacceptatiemodel voor links afslaan op een T-kruising in een simulatieomgeving, zodat verkeersveiligheidseffecten nauwkeuriger met microsimulatiemodellen kunnen worden ingeschat.*

Onder een realistisch hiaatacceptatiemodel wordt verstaan dat de modellering van de beslissing van een bestuurder is gebaseerd op de waarneembare werkelijkheid. Dit wordt gerealiseerd door in het model meer factoren mee te nemen die invloed hebben op de beslissing van een links afslaande bestuurder.

Het nieuwe hiaatacceptatiemodel is getest en er is geëvalueerd in hoeverre het nieuwe model logische uitkomsten geeft. Het nieuwe model is vergeleken met het bestaande hiaatacceptatiemodel op de verkeersveiligheid en de verkeersafwikkeling op de kruising.

Het opstellen van het model is gedaan aan de hand van beschikbare literatuur over het hiaatacceptatiegedrag. Er zijn geen gedetailleerde voertuigposities uit de werkelijk van een T-kruising beschikbaar om het model op te baseren en te valideren.

### **1.3 Onderzoeksvragen**

Op basis van de doelstelling zijn de volgende drie onderzoeksvragen geformuleerd.

- A. *Op welke manier kan de hiaatacceptatie van links afslaande bestuurders op een T-kruising realistischer worden gemodelleerd?*

In deze onderzoeksvraag staat het hiaatacceptatiemodel van de overstekende bestuurder centraal. Op basis van literatuur zijn de belangrijkste invloeden op de beslissing van een bestuurder onderzocht. De meest genoemde invloedsfactoren in de literatuur zijn meegenomen in een conceptueel model dat als basis dient voor het nieuwe hiaatacceptatiemodel.

- B. *Op welke wijze kan de conflicttheorie in microsimulatiemodellen gebruikt worden om verkeersveiligheidseffecten in te schatten?*

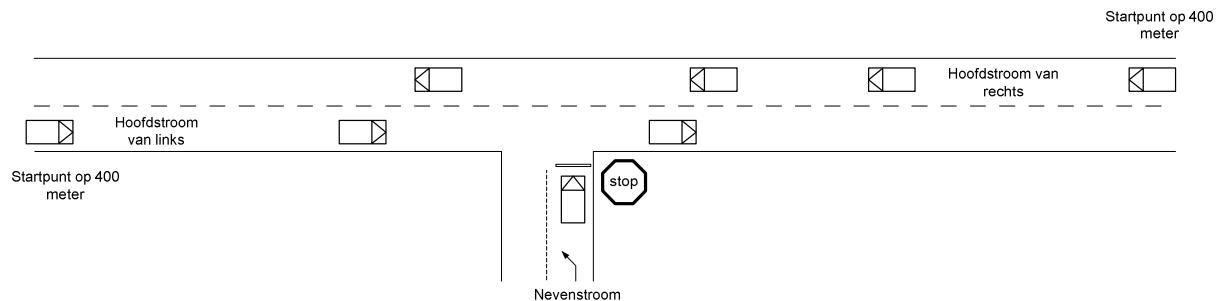
De eigenschappen en het ontstaan van de conflicttheorie als maat voor verkeersveiligheid komen aan bod. Op basis van de verkeerssituatie is een keuze gemaakt welke afgeleide veiligheidsindicatoren in deze studie gehanteerd worden. De mogelijkheden om de conflicttheorie in bestaande microsimulatiemodellen te gebruiken is beschreven. De keuze voor de simulatieomgeving waarin het nieuwe hiaatacceptatiemodel is geïmplementeerd is gebaseerd op de beantwoording van deze onderzoeksvraag.

- C. *In hoeverre leidt het nieuwe hiaatacceptatiemodel tot een nauwkeuriger inschatting van de verkeersveiligheidseffecten ten opzichte van het bestaande model?*

Het vernieuwde model is geïmplementeerd in de gekozen simulatieomgeving. Het model is getest en visueel geverifieerd. De volgende stap is een vergelijking maken tussen het bestaande hiaatacceptatiemodel en het nieuwe hiaatacceptatiemodel door het uitvoeren van simulaties. De vergelijking is uitgevoerd op de afgeleide veiligheidsindicatoren en de wachttijd van de links afslaande bestuurder.

## 1.4 Definities

In dit rapport wordt de bestuurder die vanaf de nevenstroom komt, aangeduid als de bestuurder. De bestuurders van voertuigen in de hoofdstromen worden aangeduid met hoofdstroombestuurder, zie figuur 1-2.



Figuur 1-2 Situatie T-kruising

De hoofdstroom van rechts is de stroom voertuigen die van rechts naar links rijden in figuur 1-2. De voertuigen die van links naar rechts rijden, rijden op de hoofdstroom van links. Onder verkeersstroom wordt de combinatie van beide hoofdstromen verstaan. De voertuigen in de verkeersstroom slaan niet af richting de nevenstroom.

## 1.5 Afbakening van het onderzoek

De beslissing van de links afslaande bestuurder is uitgewerkt in een STOP-situatie op een T-kruising, zie figuur 1-2. De bestuurder in de nevenstroom moet stoppen en voorrang verlenen aan de voertuigen in de hoofdstromen. Vanaf het moment dat de bestuurder stil staat, start het hiaatacceptatiemodel en beoordeelt de bestuurder de verkeerssituatie. De bestuurder heeft vrij zicht op beide hoofdstromen en combineert de hiaten in de twee hoofdstromen tot één gecombineerd hiaat. De bestuurder kan de posities en snelheden van de voertuigen op de hoofdstromen perfect beoordelen. Er worden geen verkeerde inschattingen en bewuste overtredingen van bestuurders gemodelleerd.

De T-kruising ligt binnen de bebouwde kom en heeft een maximum snelheid van 50 km/u. Vanwege de grote mate van complexiteit wordt langzaam verkeer niet gemodelleerd. De voertuigen van zowel bestuurders als hoofdstroombestuurders zijn personenvoertuigen en hebben allemaal dezelfde voertuigspecificaties.

De verkeersveiligheidseffecten worden bepaald tussen het links afslaande voertuig en de eerst opkomende voertuigen in de twee hoofdstromen. Eventuele effecten die stroomopwaarts kunnen optreden zoals kop-staart conflicten worden niet meegenomen.

In dit onderzoek wordt de implementatie van het nieuwe model visueel en functioneel gevalideerd. De visuele validatie bestaat uit een test of het rijgedrag van de bestuurders geen onlogische uitkomsten

geeft. De functionele validatie is uitgevoerd op basis van testscripts en er is bepaald of het model zich gedraagt zoals van te voren was bedacht.

Er is geen validatie uitgevoerd aan de hand van gegevens over het rijgedrag uit de werkelijkheid.

## **1.6 Onderzoeksmethode**

In het opstellen van het nieuwe model zijn drie fases te onderscheiden.

In de eerste fase is literatuuronderzoek uitgevoerd. De onderwerpen hiaatacceptatie op kruisingen, microsimulatiemodellen en verkeersveiligheidsindicatoren stonden centraal. De resultaten van eerdere onderzoeken naar de invloeden op de hiaatacceptatie zijn gebruikt om invloedsfactoren te kiezen en te onderbouwen. Een overzicht is gemaakt van de invloedsfactoren op de hiaatacceptatie van links afslaande bestuurders. Alleen de factoren die in meerdere studies zijn genoemd en betrekking hebben op de kruispuntsituatie, zijn opgenomen in het conceptuele model.

In de tweede fase is op basis van het conceptuele model en de kruispuntsituatie gewerkt aan een implementatie van het nieuwe hiaatacceptatie model in de simulatieomgeving Multi-Agent Real-time Simulator (MARS) van TNO. Aannames ten aanzien van het bestuurdersgedrag en het verkeer op de hoofdstromen zijn gedaan om een vertaling van het conceptuele model naar de implementatie te maken. De implementatie bestond uit het opstellen van een diagram met daarin de functies van het hiaatacceptatiemodel en het overige bestuurdersgedrag. Dit statediagram fungeerde als basis voor de programmering in de simulatieomgeving MARS. Door middel van een testtraject en proefexperimenten zijn het geïmplementeerde model en de bijbehorende aannames getest en verbeterd.

In de derde fase zijn experimenten uitgevoerd met het geïmplementeerde model. Simulaties met het bestaande en het nieuwe hiaatacceptatiemodel zijn uitgevoerd om de werking en de veranderingen in het bestuurdersgedrag te kunnen onderzoeken.

## **1.7 Leeswijzer**

Het vervolg van het rapport heeft de volgende indeling.

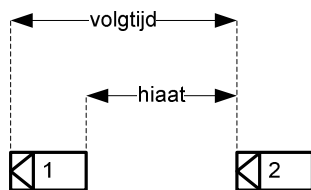
Het hiaatacceptatiemodel staat centraal in hoofdstuk 2 en daar komen de invloedsfactoren op de hiaatacceptatie die als basis dienen voor het conceptuele model aan bod. In hoofdstuk 3 worden de verkeersveiligheid en conflicttheorie beschreven en de toepassing in microsimulatiemodellen. In hoofdstuk 4 wordt het conceptuele model met het nieuwe hiaatacceptatiemodel behandeld. De implementatie van het hiaatacceptatiemodel en de aannames van het bestuurdersgedrag zijn beschreven in hoofdstuk 5. Vervolgens komen in hoofdstuk 6 de opzet en resultaten van de simulaties aan de orde. Tot slot worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen ten aanzien van het nieuwe hiaatacceptatiemodel gegeven.

## Hoofdstuk 2      Het hiaatacceptatiemodel

Dit hoofdstuk bevat de achtergronden van het bestaande hiaatacceptatiemodel en de factoren die invloed hebben op de hiaatacceptatie.

### 2.1 *Het bestaande hiaatacceptatiemodel*

Het besluit tot oversteken van een kruising kan worden weergegeven met een hiaatacceptatiemodel. De term hiaat wordt gedefinieerd als de tijd tussen twee voertuigen in de verkeersstroom die gekruist en/of waarin ingevoegd moet worden, zie figuur 2-1.



Figuur 2-1 Hiaat tussen twee voertuigen

Het hiaatacceptatiemodel is gebaseerd op de aanname dat bestuurders een hiaat in de verkeersstroom vergelijken met een zogenaamd 'kritiek' hiaat. Het kritieke hiaat moet gezien worden als een drempelwaarde. Als het hiaat in de verkeersstroom langer is dan het kritieke hiaat accepteert de bestuurder het hiaat en trekt de bestuurder op. Als het aangeboden hiaat korter is dan het kritieke hiaat, weigert de bestuurder het aangeboden hiaat en wacht op een geschikt hiaat. Het begrip kritiek hiaat en het hiaatacceptatiemodel is opgezet vanuit de noodzaak om de verkeersafwikkeling van een kruising te bepalen.

De algemeen geaccepteerde definitie van het kritieke hiaat luidt als volgt:

*Het kortste hiaat in tijdsduur tussen voertuigen in de verkeersstroom dat door een bestuurder in de nevenstroom nog wordt aangenomen om de verkeersstroom over te steken of in te voegen (Troutbeck en Brilon, 1999; Brilon en Weinert, 2001).*

Het kritieke hiaat moet worden bepaald op basis van gegevens uit de werkelijkheid. Er zijn twee lastige punten in het bepalen van het kritieke hiaat. Het eerste punt is dat het kritieke hiaat van een bestuurder niet direct te meten is. Alleen de geaccepteerde en geweigerde hiaten kunnen geobserveerd worden. Het kritieke hiaat zit tussen deze twee observaties in. Daarom is een schatting noodzakelijk op basis van de geaccepteerde en geweigerde hiaten van meerdere bestuurders. Het tweede punt is aan het eerste gerelateerd. Per bestuurder, kruising en verkeerssituatie kunnen maximaal één geaccepteerd en minimaal nul geweigerde hiaten geobserveerd worden. Hiaatacceptaties en weigeringen moeten samen worden genomen om een betrouwbare schatting uit te kunnen voeren. Door het samenvoegen is niet meer precies duidelijk wat de invloed is van bijvoorbeeld bestuurderskenmerken als geslacht of leeftijd.

In de verkeerswereld is geen discussie over het feit dat het kritieke hiaat verschilt tussen bestuurders in tijd, locatie en andere factoren. Door deze variatie kan de hiaatacceptatie worden gezien als een stochastisch proces. Het kritieke hiaat moet worden gezien als een random variabele, waarbij de parameters van de distributie van het kritieke hiaat afhankelijk kunnen zijn van externe factoren (Mahmassani en Sheffi, 1981; Brilon *et al.*, 1997).

Een schattingsmethode zou waarden voor het kritieke hiaat en voor de parameters van de kansverdeling van het kritieke hiaat moeten proberen te vinden. Volgens Brilon *et al.* (1997) zijn de maximum likelihoodmethode en de methode van Hewitt twee schattingsmethoden die zuiver het kritieke hiaat kunnen schatten en de bijbehorende parameterwaarden. In deze twee schattingsmethodes gaat men er vanuit dat bestuurders consistent en binnen een bepaalde groep homogeen zijn. Consistent wil zeggen dat een bestuurder met een bepaald kritiek hiaat altijd dezelfde beslissing neemt. Homogeen betekent dat bestuurders binnen een bepaalde groep dezelfde verdeling van het kritieke hiaat hebben. Andere schattingsmethoden die meerdere onderdelen in de hiaatacceptatie kunnen meenemen zijn probit- en logit-methoden. Een uitgebreide beschrijving van de verschillende schattingsmethoden is door Brilon en Weinert (2001) gegeven.

Volgens Brilon *et al.* (1997) zijn bestuurders in hiaatacceptatiegedrag eerder consistent dan compleet inconsistent. Het is echter het inconsistente bestuurdersgedrag dat kan leiden tot onveilige situaties op kruisingen. Daarom is het van belang dat ook het niet gemiddelde bestuurdersgedrag wordt meegenomen in het hiaatacceptatiemodel.

Door het aanmaken van verschillende bestuurdersgroepen en een verdeling van het kritieke hiaat wordt enige variatie tussen en in bestuurders aangebracht. Het is zeer lastig in de praktijk om de verschillende bestuurdersgroepen te observeren en classificeren. Daarom wordt in de meeste modellen en implementaties gewerkt met één waarde en verdeling van het kritieke hiaat voor alle bestuurders.

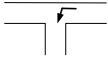
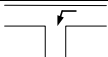
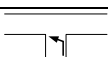
## **2.2 Invloedsfactoren op de hiaatacceptatie**

Binnen de verkeerswereld en de gedragswetenschappelijke wereld is geen theorie beschikbaar die het complete verkeersgedrag kan beschrijven. Daar is het verkeer te dynamisch en complex voor. Dit geldt ook voor het gedrag op kruisingen en het onderzoek naar de factoren die invloed hebben op de beslissing om een kruising over te steken.

## 2.2.1 Achtergronden hiaatacceptatie studies

In de literatuur komt een groot aantal verschillende invloedsfactoren op het hiaatacceptatiegedrag naar voren. De studies die zijn gevonden hebben allen een verschillende achtergrond, tabel 2-1 geeft een overzicht. De studies zijn gebruikt om een zo breed mogelijk beeld te krijgen van de invloedsfactoren op de hiaatacceptatie.

Tabel 2-1 Achtergronden van onderzoeken van invloedsfactoren hiaatacceptatie

| Studie                            | Manoeuvre                                                                           | Soort studie         |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Abou-Henaidy <i>et al.</i> (1994) |    | Veld                 |
| Alexander <i>et al.</i> (2002)    |    | Rijsimulator         |
| Archer (2005)                     |    | Veld en model        |
| Brilon en Weinert (2001)          |    | Veld                 |
| Cassidy <i>et al.</i> (1995)      |    | Veld                 |
| Darzentas <i>et al.</i> (1980)    |   | Rijsimulator         |
| Davis en Swenson (2004)           |  | Veld                 |
| Mahmassani en Sheffi (1981)       | Beiden                                                                              | Veld                 |
| Sayed <i>et al.</i> (1994)        | Beiden                                                                              | Model                |
| Spek <i>et al.</i> (2006)         |  | Veld                 |
| Staplin (1995)                    |  | Rijsimulator en veld |
| Yan <i>et al.</i> (2007)          |  | Rijsimulator         |

Studies die de manoeuvre links afslaan vanuit de hoofdstroom van rechts naar de nevenstroom hebben onderzocht zijn ook meegenomen in het overzicht. De volgende zaken moeten bij deze studies in het achterhoofd worden gehouden:

- Vanuit de hoofdstroom van rechts hoeft maar één stroom gekruist te worden. Dit heeft twee resultaten: de bestuurder hoeft maar één hiaat in te schatten en de bestuurder hoeft niet tot de snelheid te accelereren op de hoofdstroom. Vanaf de nevenstroom moet zowel gekruist als ingevoegd worden.
- Snelheid is nog moeilijker in te schatten in verkeer dat tegemoet komt dan verkeer dat loodrecht op bestuurder afkomt (Caird en Hancock, 2002).

- De druk op de afslaande bestuurders van de hoofdstroom kan hoger liggen door een hogere intensiteit en snelheid op de hoofdstroom.
- Afslaande bestuurders vanuit de hoofdstroom van rechts kunnen een hogere snelheid hebben. In sommige studies wordt hiervoor gecompenseerd (Staplin, 1995).

### 2.2.2 Schema van invloedsfactoren

De invloedsfactoren op de hiaatacceptatie die in de studies worden beschreven zijn zeer veelzijdig. In het onderzoek van Abou-Henaidy *et al.* (1994) wordt een onderverdeling en een schema voor de invloedsfactoren gegeven. De factoren zijn opgedeeld in bestuurders- en verkeerssysteemattributen en onderverdeeld in een aantal subgroepen. De onderverdeling en het schema zijn overgenomen uit het onderzoek van Abou-Henaidy *et al.* (1994) en gepresenteerd tabel 2-2. Binnen dit literatuuronderzoek is achter elke invloedsfactor vermeld in hoeveel studies de factor is onderzocht.



Tabel 2-2 Invloedsfactoren op hiaatacceptatie (indeling naar Abou-Henaidy et al. (1994))

| Hoofdgroep      | Subgroep                    | Invloedsfactor                                       | Aantal keer in onderzoeken |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------|
| Bestuurder      | Lange termijn               | Geslacht                                             | 4                          |
|                 |                             | Leeftijd                                             | 4                          |
|                 |                             | Handicap                                             |                            |
|                 |                             | Ervaring en vaardigheden                             |                            |
|                 |                             | Houding                                              |                            |
|                 | Korte termijn               | Emotie                                               |                            |
|                 |                             | Ziekte                                               |                            |
|                 |                             | Alcohol                                              |                            |
|                 |                             | Drugs                                                |                            |
|                 | Indirect                    | Type voertuig                                        | 2                          |
|                 |                             | Aanwezigheid passagiers                              | 1                          |
|                 |                             | Plaats van bestuurder in voertuig                    |                            |
|                 |                             | Temperatuur in voertuig                              |                            |
|                 |                             | Geslacht en leeftijd van passagiers                  |                            |
|                 |                             | Relatie tot passagiers                               |                            |
| Verkeerssysteem | Lange termijn               | Aantal over te steken rijstroken                     | 2                          |
|                 |                             | Wegomgeving (zicht)                                  | 1                          |
|                 |                             | Wegomgeving (ligging)                                | 1                          |
|                 |                             | Aantal rijstroken in te voegen op hoofdweg           |                            |
|                 |                             | Wegtype                                              |                            |
|                 | Korte termijn               | Licht                                                |                            |
|                 |                             | Weer                                                 |                            |
|                 |                             | Wegdek condities                                     |                            |
|                 | Gerelateerd aan hoofdstroom | Lengte hiaat (in tijd)                               | 12                         |
|                 |                             | Snelheid voertuigen                                  | 6                          |
|                 |                             | Meerdere hiaten in keuzeprocess                      | 3                          |
|                 |                             | Intensiteit en verdeling verkeer                     | 2                          |
|                 |                             | Type en grootte voertuig                             | 1                          |
|                 |                             | Lengte hiaat (in afstand)                            | 1                          |
|                 |                             | Vorm en kleur voertuigen                             |                            |
|                 |                             | Rechts afslaande voertuigen                          |                            |
|                 | Gerelateerd aan nevenstroom | Tijdsduur in wachtrij(zowel in als vooraan)          | 3                          |
|                 |                             | Aanwezigheid voertuigen achter bestuurder            | 1                          |
|                 |                             | Aantal geweigerde hiaten (gecorrleerd met tijdsduur) | 1                          |

Het valt op dat nauwelijks gegevens zijn te vinden over de korte termijn factoren in de onderzoeken. Deze factoren kunnen grote invloed hebben op het rijdrag van bestuurders en daarmee op de hiaatacceptatie. Ze zijn echter niet meegenomen in het conceptuele model omdat op het gebied van hiaatacceptatie geen gegevens over de invloed van deze factoren bekend zijn.

De invloedsfactoren die in meerdere studies zijn genoemd, zijn in de volgende paragraaf beschreven. De factor lengte van het hiaat in tijd is niet besproken aangezien dit al aan bod is gekomen bij de bespreking van het bestaande hiaatacceptatie model.

## **2.3 Uitwerking van de invloedsfactoren op de hiaatacceptatie**

### **2.3.1 Leeftijd van de bestuurder**

In een rij simulatorstudie naar links afslaan vanaf de nevenstroom zijn drie leeftijdsklassen gebruikt: jong 20-30 jaar, middel 31-55 jaar en oud 56-83 jaar (Yan *et al.*, 2007). De oude groep accepteert langere hiaten; 7,94 seconden tegenover jong 6,29 seconden en middel 6,20 seconden. De spreiding bij de oudere groep is groter dan bij de twee andere groepen wat kan duiden op grotere verschillen binnen de groep. In een andere rij simulatorstudie van Alexander *et al.* (2002) zijn twee klassen onderscheiden. De klasse boven de 60 jaar was object van het onderzoek en bestuurders onder de 60 jaar dienden als controlegroep, met respectievelijk een kritiek hiaat van 9,1 en 8,3 seconden. De resultaten komen in grote mate overeen met ander onderzoek naar invloeden van leeftijd, geslacht en snelheid (Darzentas *et al.*, 1980). In het veldonderzoek van Abou-Henaidy *et al.* (1994) is de invloed van leeftijd niet significant bevonden. Drie leeftijdsklassen zijn gebruikt: jong onder 25 jaar, middel 25 tot 60 jaar en oud boven de 60 jaar. De leeftijden van de bestuurders in dat onderzoek zijn geschat door observatoren.

De focus van alle onderzoeken ligt vooral op de oudere bestuurders. De invloed van echt jonge en onervaren bestuurders is in geen van de onderzoeken onderwerp van studie geweest. Men zou verwachten dat jonge en onervaren bestuurders wel een ander hiaatacceptatiegedrag zouden kunnen hebben. Het ongevalrisico van jonge onervaren bestuurders is een stuk hoger dan bij overige bestuurdersgroepen (SWOV, 2008).

Uit de drie rij simulatorstudies kan worden geconcludeerd dat ouderen boven de 60 jaar een langer kritiek hiaat hebben. De leeftijd is meegenomen in het conceptuele model. De twee leeftijdsklassen, ouder dan 60 jaar en jonger dan 60 jaar zijn aangehouden.

### **2.3.2 Geslacht van de bestuurder**

Yan *et al.* (2007) constateren dat mannen een korter hiaat accepteren dan vrouwen, respectievelijk gemiddeld 6,38 en 6,93 seconden. De spreiding bij beide geslachten is gelijk. Het onderzoek van Alexander *et al.* (2002) geeft aan dat mannen een gemiddeld kritiek hiaat hanteren van 8,7 en vrouwen van 9,5 seconden. Sayed *et al.* (1994) gebruiken in zijn model een combinatie van gegevens van Darzentas *et al.* (1980) en Polus (1983) voor een onderscheid in vier groepen gebaseerd op leeftijd en geslacht. In het veldonderzoek van Abou-Henaidy *et al.* (1994) is de invloed van het geslacht significant. Mannen hebben een 0,46 seconden korter kritiek hiaat dan vrouwen.

In alle studies komt naar voren dat geslacht invloed heeft op de lengte van het kritieke hiaat. Het geslacht als invloedsfactor op het kritieke hiaat is meegenomen in het conceptuele model. Daarbij is het kritieke hiaat van mannen korter dan dat van vrouwen.

### 2.3.3 Type voertuig

In twee studies is het type voertuig naar voren gekomen als invloedsfactor op het kritieke hiaat. Sayed *et al.* (1994) gebruikt een 30% langer kritiek hiaat voor zware voertuigen. Dit is gebaseerd op een lagere acceleratie en deceleratie van deze voertuigen. De aanname wordt niet onderbouwd met onderzoeksgegevens. Abou-Henaidy *et al.* (1994) vinden in hun veldstudie dat het type voertuig geen invloed heeft op het kritieke hiaat. Het type voertuig is niet meegenomen in het conceptuele model omdat de gevonden literatuur niet eenduidig is.

### 2.3.4 Aantal rijstroken

In het onderzoek van Abou-Henaidy *et al.* (1994) en het model van Sayed *et al.* (1994) wordt rekening gehouden met het aantal over te steken rijstroken. Er wordt gewerkt met een correctiefactor van respectievelijk 0,2 en 0,25 seconden per rijstrook. In de verkeerssituatie van dit onderzoek hoeft maar één rijstrook overgestoken te worden. Deze factor is daarom niet meegenomen in het conceptuele model.

### 2.3.5 Snelheid in de hoofdstromen

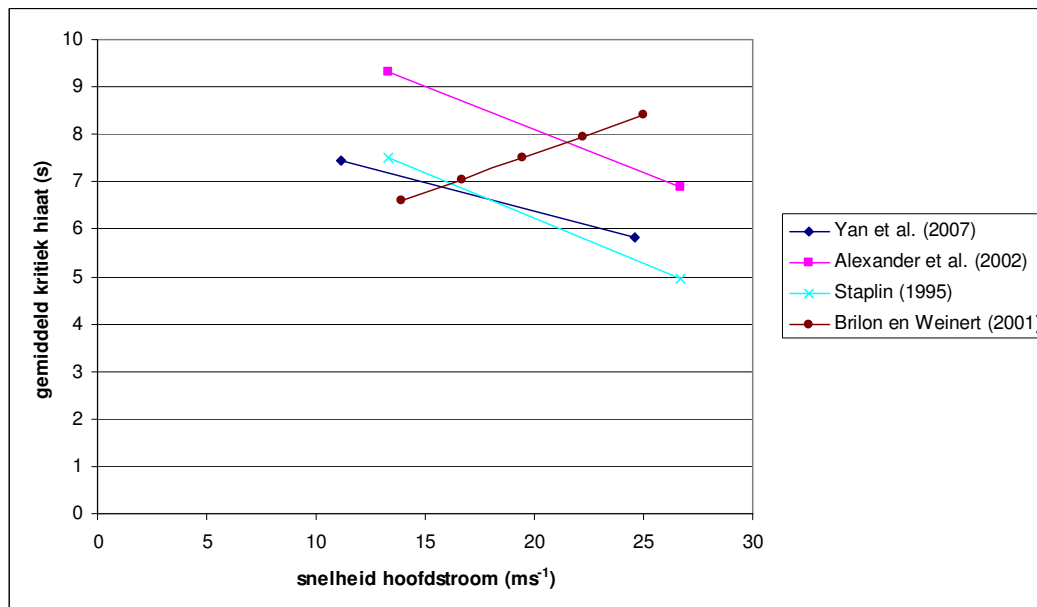
De handeling die een bestuurder moet uitvoeren om links af te slaan vanaf een nevenstroom kan opgesplitst worden in twee subhandelingen. Het verkeer in de hoofdstroom van links moet gekruist worden en in het verkeer in de hoofdstroom van rechts moet ingevoegd worden. Het effect van de snelheid van de voertuigen in de hoofdstroom op deze twee subhandelingen kan verschillend zijn. De verwachting is dat de tijd die het kost om de hoofdstroom van links te kruisen, onafhankelijk is van de snelheid van de hoofdstroom. Dit betekent dat bij een twee keer zo hoge snelheid op de hoofdstroom het kritieke hiaat ook twee keer zo lang zou moeten worden. Een andere verwachting is dat de tijd die het kost om in de hoofdstroom van rechts in te voegen, wel afhankelijk is van de snelheid in de hoofdstroom. Bij het invoegen moet de bestuurder namelijk de tijd hebben om te versnellen tot de snelheid van de voertuigen in de hoofdstroom. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat het verkeer in de hoofdstroom zijn snelheid niet in grote mate zal aanpassen. Bij een twee keer zo hoge snelheid op de hoofdstroom zou het kritieke hiaat meer dan twee keer zo lang moeten worden. De verwachting is dat links afslaande bestuurders vanaf de nevenstroom een langer kritiek hiaat hanteren bij een hogere snelheid van de voertuigen in de hoofdstroom. Door het kritieke hiaat te verlengen blijft het risico op een conflict voor de bestuurder vanaf de nevenstroom gelijk ten opzichte van een situatie met een lagere snelheid op de hoofdstroom.

Ten aanzien van het kruisen vindt men in bijna alle studies dat een hogere snelheid van de voertuigen in de hoofdstroom leidt tot kortere kritieke hiaten (Staplin, 1995; Alexander *et al.*, 2002; Davis en Swenson, 2004; Spek *et al.*, 2006). De auteurs stellen dat verkorting van het kritieke hiaat veroorzaakt kan worden door een slechte perceptie en inschatting van de snelheid door de bestuurder. Een

andere mogelijkheid is dat bestuurders een hoger risico aanvaarden. De snelheid wordt wel goed in geschat maar daaraan wordt geen conclusie verbonden door een langer kritiek hiaat te hanteren.

Ten aanzien van het invoegen zijn tegenstrijdige resultaten uit de literatuur te vinden. Een hogere snelheid bij het links afslaan en invoegen op de hoofdstroom leidt tot een verkorting van het kritieke hiaat (Yan *et al.*, 2007). Een ander resultaat is dat het kritieke hiaat langer wordt bij een hogere snelheid in de hoofdstroom (Brilon en Weinert, 2001). De snelheid wordt door Brilon en Weinert (2001) niet meegenomen als invloedsfactor op de hiaatacceptatie, omdat de spreiding van de invloed over de door hun onderzochte kruisingen groot is en de snelheid bij de andere manoeuvres geen invloed op de hiaatacceptatie heeft. Daarnaast wordt door de onderzoekers getwijfeld of bestuurders snelheid en afstand goed kunnen inschatten.

In figuur 2-2 zijn de resultaten van de hierboven genoemde studies grafisch weergegeven. In de figuur is het gemiddelde kritieke hiaat uitgezet tegen de snelheid op de hoofdstroom. Behalve de studie van Brilon en Weinert (2001) geven alle studies een negatief verband aan; hoe hoger de snelheid van het verkeer op de hoofdstroom, des te korter het kritieke hiaat is. De uitkomsten van de studie van Brilon en Weinert (2001) worden niet gehanteerd omdat zij in hun eigen model de snelheid niet als invloedsfactor meenemen. Alle vier de studies geven aan dat bestuurders de snelheid niet goed kunnen inschatten. In het conceptuele model is een negatief verband aangehouden tussen de snelheid in de hoofdstroom en het kritieke hiaat. Dit betekent dat bij een hogere snelheid een korter kritiek hiaat wordt aangehouden. Het risico van de links afslaande bestuurder wordt hierdoor hoger.



Figuur 2-2 Invloed van snelheid op kritiek hiaat

### 2.3.6 Wachtijd van de bestuurder en verkeersintensiteit in de hoofdstromen

De wachttijd van de bestuurder en de intensiteit van de hoofdstromen worden samen genomen als één factor. Er is namelijk een correlatie tussen deze twee factoren.

In een groot aantal studies wordt de wachttijd van een bestuurder op een geschikt hiaat meegenomen als verklarende variabele voor het kritieke hiaat (Mahmassani en Sheffi, 1981; Abou-Henaidy *et al.*, 1994; Sayed *et al.*, 1994; Cassidy *et al.*, 1995). Enkele studies hanteren het aantal geweigerde hiaten als maat, anderen de tijd van wachten vooraan de wachtrij.

In de studie van Mahmassani en Sheffi (1981) wordt het kritieke hiaat, van 7,2 seconden, na elk geweigerd hiaat 0,94 seconden korter. Niet altijd wordt een lineair verband gevonden (Abou-Henaidy *et al.*, 1994). In een aantal microsimulatiemodellen wordt het kritieke hiaat korter, naarmate de wachttijd langer wordt (Sayed *et al.*, 1994; Hidas, 2005; Liu, 2005). De mate waarin het kritieke hiaat korter wordt kan ingesteld worden. In het model van Liu (2005) model kan geen uitsplitsing naar bestuurder worden gemaakt.

Twee studies hebben geen relatie gevonden tussen de wachttijd van bestuurders en de hiaatacceptatie (Brilon en Weinert, 2001; Archer, 2005). Beide stellen dat er wel een verband is tussen de verkeersintensiteit van de hoofdstromen en het kritieke hiaat. Een hogere verkeersintensiteit leidt tot een korter kritiek hiaat (Brilon en Weinert, 2001). Bij een hogere verkeersintensiteit komen korte hiaten vaker voor dan lange hiaten. De bandbreedte van de hiaten waaruit de bestuurder kan kiezen wordt daarmee ingeperkt. Om toch binnen een redelijke termijn zonder te veel vertraging de kruising over te steken zal de bestuurder zijn kritiek hiaat moeten verkorten. Bij hoge verkeersintensiteiten kunnen dus alleen korte kritieke hiaten worden gevonden (Brilon en Weinert, 2001).

Er zijn twee fenomenen:

1. Door langer te wachten daalt het kritieke hiaat.
2. Een hoge verkeersintensiteit gaat samen met meer korte hiaten in het verkeer. Om over te kunnen steken in druk verkeer 'moeten' bestuurders een korter hiaat accepteren.

Het is niet duidelijk of de lange wachttijd of de hoge verkeersintensiteit de oorzaak is van een kort kritiek hiaat. Ze gaan vaak samen. In het conceptuele model is er vanuit gegaan dat bestuurders bij een hoge verkeersintensiteit al a priori een korter kritiek hiaat hebben. Dit kritieke hiaat verandert niet gedurende de tijd die een bestuurder staat te wachten. Een hogere intensiteit van de hoofdstromen leidt tot kortere kritieke hiaten.

### 2.3.7 Meerdere hiaten in de beslissing

In drie onderzoeken wordt aangegeven dat in toekomstig onderzoek de verkeersstroom meegenomen zou moeten worden in de modellering van de beslissing van de bestuurder (Abou-Henaidy *et al.*, 1994; Archer, 2005; Spek *et al.*, 2006). Hiermee wordt bedoeld dat niet alleen het eerste hiaat in de keuze mee zou moeten wegen, maar ook de hiaten verder stroomopwaarts. De verkeersstroom zou zowel in het beslissingsmechanisme als in de implementatie in een modelomgeving moeten worden verwerkt. De drie onderzoeken geven geen concrete voorbeelden hoe dit uitgewerkt kan worden.

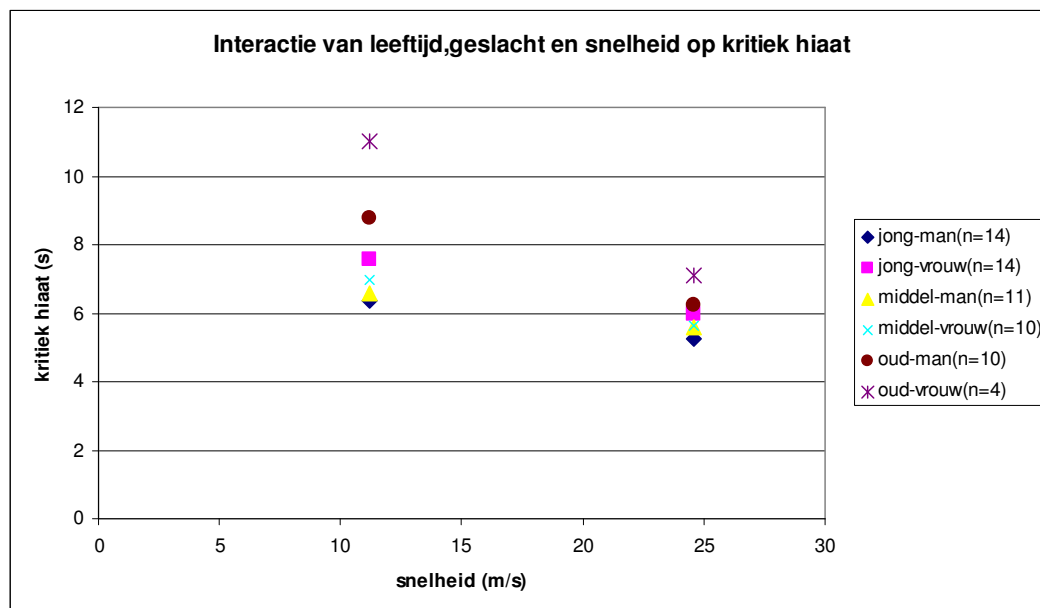
In de handleiding van het microsimulatiemodel VISSIM 4.30 wordt beschreven dat de bestuurder een plan maakt om de kruising over te steken (PTV, 2007). Daarbij wordt de verkeersstroom meegenomen in de keuze. Welke invloed de verkeersstroom precies heeft in het beslismodel van VISSIM kan niet worden achterhaald.

Het is duidelijk dat er belangstelling is om de beslissing van een bestuurder niet alleen op het eerste hiaat te modelleren. Er zijn geen concrete aanwijzingen in de literatuur te vinden over de manier waarop meerdere hiaten in de beslissing meegenomen kunnen worden. Door de meerdere hiaten in de beslissing van de bestuurder uit te werken binnen dit onderzoek kan een stap worden gezet naar een realistischer hiaatacceptatiemodel. In hoofdstuk 4 is het nieuwe hiaatacceptatie model met meerdere hiaten in de beslissing verder uitgewerkt.

## 2.4 Interactie tussen de invloedsfactoren

De beschreven invloedsfactoren kunnen naast een directe invloed ook een interactie-effect hebben. Dat wil zeggen dat gecombineerde invloedsfactoren een ander effect geven dan de afzonderlijke factoren. Alleen in het rijnsimulatoronderzoek van Yan *et al.* (2007) wordt de interactie daadwerkelijk onderzocht en gevonden.

In onderzoek van Yan *et al.* (2007) is een interactie-effect gevonden tussen de leeftijd en de snelheid in de hoofdstroom. In figuur 2-3 is de interactie weergegeven. De conclusie van de onderzoekers is dat in het lage snelheidsregime verschil bestaat in de kritieke hiaten tussen de ouderen, de jongeren en de midden groep. Bij de hoge snelheid is geen statistisch verschil in kritiek hiaat tussen de leeftijdsgroepen. Uitkomsten van een rijnsimulatorstudie onderbouwen het feit dat er geen verschil in kritiek hiaat is tussen ouderen en jongeren bij een hoge snelheid (Darzentas *et al.*, 1980).



Figuur 2-3 Interactie van leeftijd, geslacht en snelheid op kritiek hiaat (Yan *et al.*, 2007).

In het conceptuele model wordt de factor leeftijd verbonden met de factor snelheid. Bij een hoge snelheid is geen verschil in kritiek hiaat tussen de leeftijdscategorieën. Bij een lage snelheid is er wel verschil in kritiek hiaat tussen de leeftijdscategorieën.

## 2.5 Conclusies

Hiaatacceptatiemodellen zijn ontwikkeld om de doorstroming van een kruising te berekenen en te kunnen simuleren. Het hiaatacceptatie model is gebaseerd op het concept kritiek hiaat. Een hiaat in het verkeer dat langer is dan het kritieke hiaat, wordt door een bestuurder geaccepteerd en de bestuurder start de invoegmanoeuvre. Een hiaat korter dan het kritieke hiaat wordt geweigerd. Het kritieke hiaat is daarmee een drempelwaarde. Het kritieke hiaat moet worden geschat op basis van geweigerde en aangenomen hiaten in het verkeer. Meer verschillen tussen en in bestuurders in het kritieke hiaat leidt tot meer detail in het bestuurdersgedrag. Uit literatuurstudie is gebleken welke kenmerken van bestuurders en het verkeerssysteem invloed hebben op het kritieke hiaat. De vijf invloedsfactoren op het kritieke hiaat en de meerdere hiaten in de beslissing, gepresenteerd in tabel 2-3, zijn in het conceptuele model van het nieuwe hiaatacceptatiemodel meegenomen. De factor meerdere hiaten in de beslissing wordt in hoofdstuk 4 verder uitgewerkt en lijkt een belangrijke stap te zijn om het bestaande hiaatacceptatiemodel realistischer te maken.

*Tabel 2-3 Invloedsfactoren op de hiaatacceptatie*

| <b>Invloedsfactor</b>                       | <b>Beschrijving</b>                                                            |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Geslacht: man en vrouw.                     | Mannen hebben een korter kritiek hiaat.                                        |
| Leeftijd onder 60 jaar, boven 60 jaar.      | Ouderen hebben een langer kritiek hiaat.                                       |
| Snelheid van voertuigen in de hoofdstromen. | Hoe hoger de snelheid, hoe korter het kritieke hiaat.                          |
| Intensiteit van de hoofdstromen.            | Hoe hoger de intensiteit, hoe korter het kritieke hiaat.                       |
| Interactie-effect snelheid en leeftijd.     | Bij een hoge snelheid is er geen verschil in kritiek hiaat per leeftijdsgroep. |
| Meerdere hiaten in beslissing.              | De verkeersstroom wordt meegenomen in de beslissing.                           |

## Hoofdstuk 3      Verkeersveiligheidseffecten in microsimulatiemodellen

---

De conflicttheorie en de afgeleide veiligheidsindicatoren worden in dit hoofdstuk behandeld, evenals de keuze van de simulatieomgeving. De mogelijkheden en beperkingen van de simulatieomgeving waarin het model wordt geïmplementeerd staan beschreven.

### **3.1 Verkeersveiligheidseffecten en de conflicttheorie**

Verkeersveiligheid is een uitkomst van het verkeerssysteem. De gedragingen van en interactie tussen bestuurders, voertuigen en omgeving beïnvloeden de verkeersveiligheid. De verkeersveiligheid wordt traditioneel uitgedrukt door het aantal ongevallen of slachtoffers naar ernst uit te zetten over een bepaalde tijd en locatie. Vaak wordt een expositiegraad gehanteerd om de veiligheid bijvoorbeeld te relateren aan de hoeveelheid verkeer of het aantal reizigerskilometers.

Om het verkeersveiligheidseffect van bijvoorbeeld een infrastructurele maatregel te kunnen beoordelen worden “voor en na” studies uitgevoerd. Een lastig punt bij deze studies is dat het aantal ongevallen op één locatie binnen een bepaald tijdvak vaak te laag is om statistisch betrouwbare uitspraken te doen over het effect van de maatregel (Chin en Quek, 1997).

Dit was één van de redenen om eind jaren zeventig te gaan kijken naar verkeerssituaties die bijna tot ongevallen leiden. Dit worden zogenaamde conflictsituaties tussen weggebruikers genoemd. Uitgangspunt is dat deze conflictsituaties vaker voorkomen dan ongevallen en dat er een relatie is tussen conflicten en ongevallen (Van der Horst, 1990; Archer, 2005). De internationaal gehanteerde definitie van een conflict is:

*“An observable situation in which two or more road-users approach each other in time and space to such an extent that there is risk of collision if their movements remain unchanged.”*  
(Amundsen en Hydén, 1977)

Een conflict hoeft niet per se te leiden tot een ongeval. In de wetenschappelijke wereld is overeenstemming over het feit dat een groter aantal conflicten een lagere verkeersveiligheid kan aangeven (Gettman en Head, 2003). Er is nog wel discussie over de relatie tussen ongevallen en conflicten. Chin en Quek (1997) geven daarbij aan dat de discussie gedeeltelijk voortkomt uit het feit dat de kwaliteit en hoeveelheid van de ongevallendata te wensen overlaat. Als de conflicttheorie vooral wordt gebruikt om voor en na situaties te vergelijken dan is de validiteit met ongevallencijfers een minder belangrijk issue (Chin and Quek, 1997).

Conflicten kunnen worden geobserveerd in de werkelijkheid en in microsimulatiemodellen. In verschillende landen zijn in het verleden conflictobservatiestudies uitgevoerd. Een voorbeeld is de Nederlandse conflictobservatie techniek (Kraay *et al.*, 1986).



## **3.2 Conflicten en afgeleide veiligheidsindicatoren**

De ernst van een conflict kan worden bepaald door afgeleide veiligheidsindicatoren (Van der Horst, 1990; Chin en Quek, 1997; Gettman en Head, 2003; Archer, 2005). In dit onderzoek worden de indicatoren die conflicten beschrijven “afgeleide veiligheidsindicatoren” genoemd.

### **3.2.1 Time-to-collision**

Een belangrijke afgeleide veiligheidsindicator om conflicten te beschrijven is de time-to-collision (TTC). Hoe korter de minimale TTC-waarde des te hoger het risico op een botsing is. De TTC kan alleen worden bepaald bij voertuigen die een botskoers hebben (Van der Horst, 1990). De minimale TTC-waarde gedurende een manoeuvre wordt gebruikt als indicator voor een conflict (Minderhoud en Bovy, 2001; Gettman en Head, 2003; Archer, 2005).

De TTC wordt elke tijdstap berekend door het afstandsverschil van twee voertuigen te delen door het dan heersende snelheidsverschil. Onderscheid wordt gemaakt in de ernst van het conflict door het gebruik van drempelwaarden. In deze studie wordt een minimale TTC korter dan 1,5 seconden beschouwd als een conflict. Deze waarde is gebaseerd op onderzoek op kruisingen door Van der Horst (1990). De TTC wordt minder geschikt geacht voor kruisende conflicten (Van der Horst, 1990; Archer, 2005).

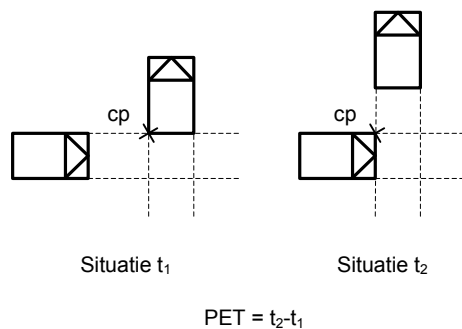
In de berekening van de TTC wordt alleen rekening gehouden met het snelheidsverschil tussen de twee voertuigen. De absolute snelheid wordt niet meegenomen en daardoor zegt een minimale TTC-waarde weinig over de impact van het conflict als het tot een ongeval zou zijn gekomen (Archer, 2005). Een TTC-waarde van 0,5 seconden bij een snelheid van 15 km/u of 120 km/u kan een heel andere uitkomst hebben als het tot een ongeval zou hebben geleid. In verschillende studies worden daarom extra indicatoren als snelheid of de gemiddelde deceleratie gedurende een manoeuvre meegenomen (Gettman en Head, 2003; Archer, 2005).

De minimale TTC-waarde wordt alleen berekend tussen het invoegende voertuig en het eerste voertuig uit de hoofdstroom van rechts. Eventuele kop-staart conflicten stroomopwaarts in de hoofdstroom van rechts worden niet meegenomen.

### **3.2.2 Post-encroachment-time**

Voor kruisende conflicten is de post-encroachment-time (PET) meer geschikt dan de TTC (Van der Horst, 1990; Gettman en Head, 2003; Archer, 2005). De PET is gedefinieerd als de tijd die verstrijkt tussen het moment dat het eerste voertuig het (toekomstig) pad van het tweede voertuig verlaat en het moment dat het tweede voertuig het pad van het eerste voertuig bereikt (Van der Horst, 1990), zie figuur 3-1.

De PET wordt op één punt berekend en er is geen botskoers noodzakelijk. De gedachte achter de PET is dat bij korte waarden maar iets hoeft te gebeuren en het risico op een ongeval wordt hoger.



*Figuur 3-1 Post encroachment-time (Van der Horst, 1990)*

De PET drempelwaarde voor een conflict wordt in deze studie gezet op 1,5 seconden. Een PET drempelwaarde voor conflicten van 1 seconde wordt door Van der Horst (1990) geadviseerd. Evenals in de studie van Archer (2005) is van dit advies afgeweken om er voor te zorgen dat een voldoende aantal PET conflicten geregistreerd wordt. De drempelwaarde van 1,5 seconden blijft onder de 2 seconden, waarboven Van der Horst (1990) stelt dat normale manoeuvres worden uitgevoerd.

Net zoals bij de TTC wordt bij de PET geen rekening gehouden met de impact van een conflict als het tot een ongeval zou leiden. De gemiddelde deceleratie kan ook hier worden gebruikt als extra indicator. De PET wordt alleen berekend tussen het invoegende voertuig en het opkomende voertuig van de hoofdstroom van links. Eventuele kop-staart conflicten stroomopwaarts worden in deze hoofdstroom ook niet gemeten.

### **3.3 Afgeleide veiligheidsindicatoren in microsimulatiemodellen**

In microsimulatiemodellen kunnen afgeleide veiligheidsindicatoren als TTC en PET gebruikt worden om conflicten te beschrijven en daarmee kunnen verkeersveiligheidseffecten worden geschat. Om de geloofwaardigheid van het gebruik van afgeleide veiligheidsindicatoren te vergroten dient het bestuurdersgedrag gedetailleerder te worden weergegeven in microsimulatiemodellen (Hidas, 2005; Gettman en Pu, 2006; Morsink en Wismans, 2008). Zowel precieze voertuigposities als meer variatie tussen en in bestuurders zijn punten die bijdragen aan een meer gedetailleerd bestuurdersgedrag (Hidas, 2005; Gettman en Pu, 2006).

### **3.4 Hiaatacceptatie in microsimulatiemodellen**

In hoofdstuk 2 is beschreven hoe het bestaande hiaatacceptatiemodel werkt op basis van het kritieke hiaat en de schatting van het kritieke op basis van gegevens uit de praktijk. Het hiaatacceptatiemodel is in een aantal microsimulatiemodellen geïmplementeerd.

In een aantal microsimulatiemodellen (S-PARAMICS, Q-PARAMICS en AIMSUN) wordt gebruik gemaakt van types bestuurders in de hiaatacceptatiemodellering. In S-PARAMICS kan worden ingesteld in welke mate de bestuurders zijn verdeeld in de mate van agressiviteit en oplettendheid. Een normale verdeling over de bestuurders is aangenomen (SIAS, 2007). De microsimulatiemodellen AIMSUN (Hidas, 2005) en DRACULA (Liu, 2005) nemen de wachttijden van bestuurders mee als

factor die het hiaatacceptatie proces beïnvloedt. In Q-PARAMICS kan de agressiviteit en het geduld van een bestuurder ingesteld worden via een kansverdeling (Hidas, 2005).

In VISSIM kan per kruising een kritiek hiaat ingesteld worden dat door alle bestuurders wordt gebruikt (PTV, 2007). In de huidige implementatie van het kruispuntmodel in de simulatieomgeving MARS wordt één kritiek hiaat gehanteerd voor alle bestuurders (Abdoelbasier, 2006) en wordt alleen het eerste hiaat geëvalueerd in de beslissing van een bestuurder.

### **3.5 Keuze van de simulatieomgeving MARS**

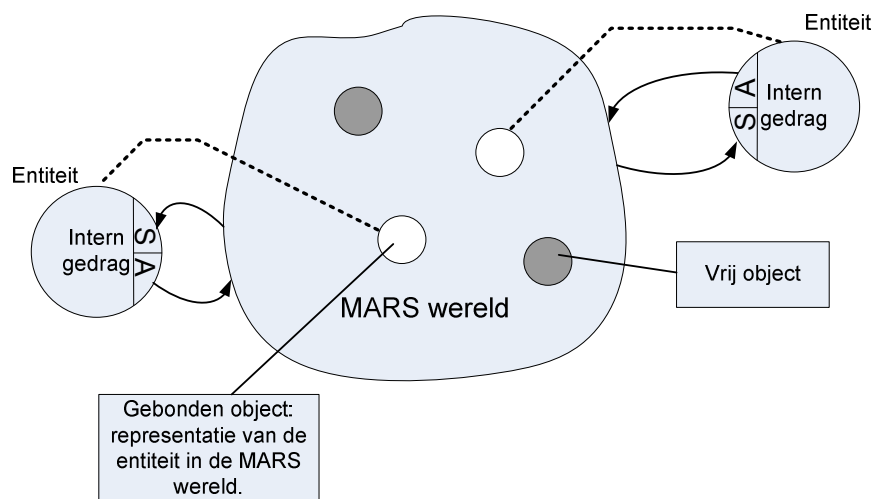
Het hiaatacceptatiemodel is ontwikkeld in de simulatieomgeving Multi-Agent Real-time Simulator (MARS) van TNO (Abdoelbasier, 2006; Papp *et al.*, 2006). Het microsimulatiemodel S-PARAMICS (SIAS, 2007), VISSIM (PTV, 2007) en de simulatieomgeving MARS zijn onderzocht op hun geschiktheid om het nieuwe hiaatacceptatiemodel te implementeren. MARS bood de meeste kansen om het hiaatacceptatiemodel in te ontwikkelen, omdat het hiaatacceptatiegedrag in MARS direct in de bestuurder kan worden geïmplementeerd en er toegang is tot de programmacode via TNO.

In onderzoek van Abdoelbasier (2006) is bestuurdersgedrag op een gelijkwaardige T-kruising in MARS geïmplementeerd. Dit bestaande bestuurdersgedrag moet nog gecalibreerd en gevalideerd worden. In eerste instantie was het de bedoeling om het nieuwe hiaatacceptatiemodel te ontwikkelen op basis van het al geïmplementeerde bestuurdersgedrag in MARS. Uiteindelijk is gekozen voor een nieuwe implementatie van het bestuurdersgedrag voor een STOP-situatie op een T-kruising en een vernieuwd hiaatacceptatiemodel. Door de nieuwe implementatie is het model overzichtelijker geworden en kan het model makkelijker worden hergebruikt in vervolgonderzoek. Een voordeel van de eigen implementatie is dat het duidelijk is wat in het model is opgenomen en hoe het model werkt. Door de eigen implementatie zijn er wel extra aannames gedaan ten aanzien van het rijgedrag van de links afslaande bestuurder en de hoofdstroombestuurders.

#### **3.5.1 Beschrijving van MARS**

MARS is eerder gebruikt in een studie naar de effecten van een ADA-systeem op snelwegen (Van Arem *et al.*, 2007) en het bestuurdersgedrag op een T-kruising (Abdoelbasier, 2006).

De volgende beschrijving van MARS is gebaseerd op de omschrijving gegeven door Abdoelbasier (2006). De simulatieomgeving MARS bestaat uit entiteiten die via de MARS wereld met elkaar kunnen communiceren, zie figuur 3-2. Een entiteit kan een fysiek object uit de werkelijkheid zijn als een voertuig, een bestuurder of een abstract begrip. Een entiteit neemt de wereld waar via sensoren (S) en kan via actuatoren (A) invloed uitoefenen op de omgeving. Elke entiteit heeft zijn eigen interne gedrag. Een entiteit wordt in de MARS wereld gerepresenteerd door een gebonden object. Vrije objecten, zoals een weg of een verkeersbord, hebben alleen eigenschappen maar geen eigen gedrag. Figuur 3-2 geeft de MARS wereld, de objecten en entiteiten weer.



Figuur 3-2 Simulatieomgeving MARS met entiteiten en objecten in de MARS wereld (Abdoelbasier, 2006)

De eigenschap dat een entiteit zijn eigen interne gedrag kan hebben maakt het mogelijk om elke bestuurder zijn eigen gedragsmodel mee te geven. Daarmee heeft de MARS omgeving geen beperking aan de mogelijkheden om variatie tussen en in bestuurders te modelleren.

### 3.5.2 Gebruik van MARS

Er zitten enkele beperkingen aan het gebruik van MARS.

Het bestaande kruispuntmodel is nog in ontwikkeling. Dit betekent bijvoorbeeld dat nog geen calibratie is gedaan voor zowel het bestaande gedrag van voertuigen op de T-kruising als het voertuigvolgedrag van voertuigen in de hoofdstromen (Abdoelbasier, 2006).

In MARS kunnen een beperkt aantal voertuigen tegelijk aanwezig zijn in de simulatie. Het werkelijke aantal hangt van veel factoren af. In dit onderzoek kunnen maximaal 26 voertuigen tegelijk in de simulatie aanwezig zijn. Tabel 3-1 geeft een overzicht hoe deze voertuigen zijn verdeeld over de verkeersstromen. Nadat voertuigen de kruising zijn gepasseerd worden ze in de hoofdstroom van rechts en de hoofdstroom van links respectievelijk op 200 meter en 100 meter na de kruising weggehaald. Zo kan sneller een nieuw voertuig worden gestart aan het begin van de kruising.

Tabel 3-1 Aantal voertuigen in simulatie per hoofdstroom

| Stroom                 | Aantal voertuigen |
|------------------------|-------------------|
| Hoofdstroom van rechts | 14                |
| Hoofdstroom van links  | 11                |
| Nevenstroom            | 1                 |

De simulatietijdstap is 0,1 seconden en vergelijkbaar met andere microsimulatiemodellen. Een kortere tijdstap is mogelijk, maar dan wordt de rekentijd ook langer. De simulatie in MARS met 26 voertuigen en een simulatietijdstap van 0,1 seconden verloopt real-time.

MARS kan niet gebruikt worden om grootschalige netwerken door te rekenen. Een koppeling van het kruispuntmodel in MARS met een bestaand microsimulatiemodel is één van de mogelijkheden om de effecten op netwerkniveau te berekenen.

### **3.6 Conclusies**

Verkeersveiligheidseffecten worden traditioneel met ongevalgegevens bepaald. Deze traditionele maat voor verkeersveiligheid kan niet worden toegepast in microsimulatiemodellen. De conflicttheorie, gebaseerd op bijna-ongevallen, kan wel worden toegepast om de verkeersveiligheid te evalueren in microsimulatiemodellen. Met behulp van afgeleide veiligheidsindicatoren TTC en PET kan de ernst van een conflict worden bepaald. Om de conflicttheorie toe te passen in microsimulatiemodellen moeten exacte voertuigposities en variatie in het bestuurdersgedrag aanwezig zijn. De simulatieomgeving MARS biedt, door de mogelijkheden om het bestuurdersgedrag zeer gedetailleerd te modelleren, goede mogelijkheden om een nieuw hiaatacceptatiemodel in te ontwikkelen. Er moeten wel extra aannames worden gedaan ten aanzien van het rijgedrag van de links afslaande bestuurder en de hoofdstroombestuurders.

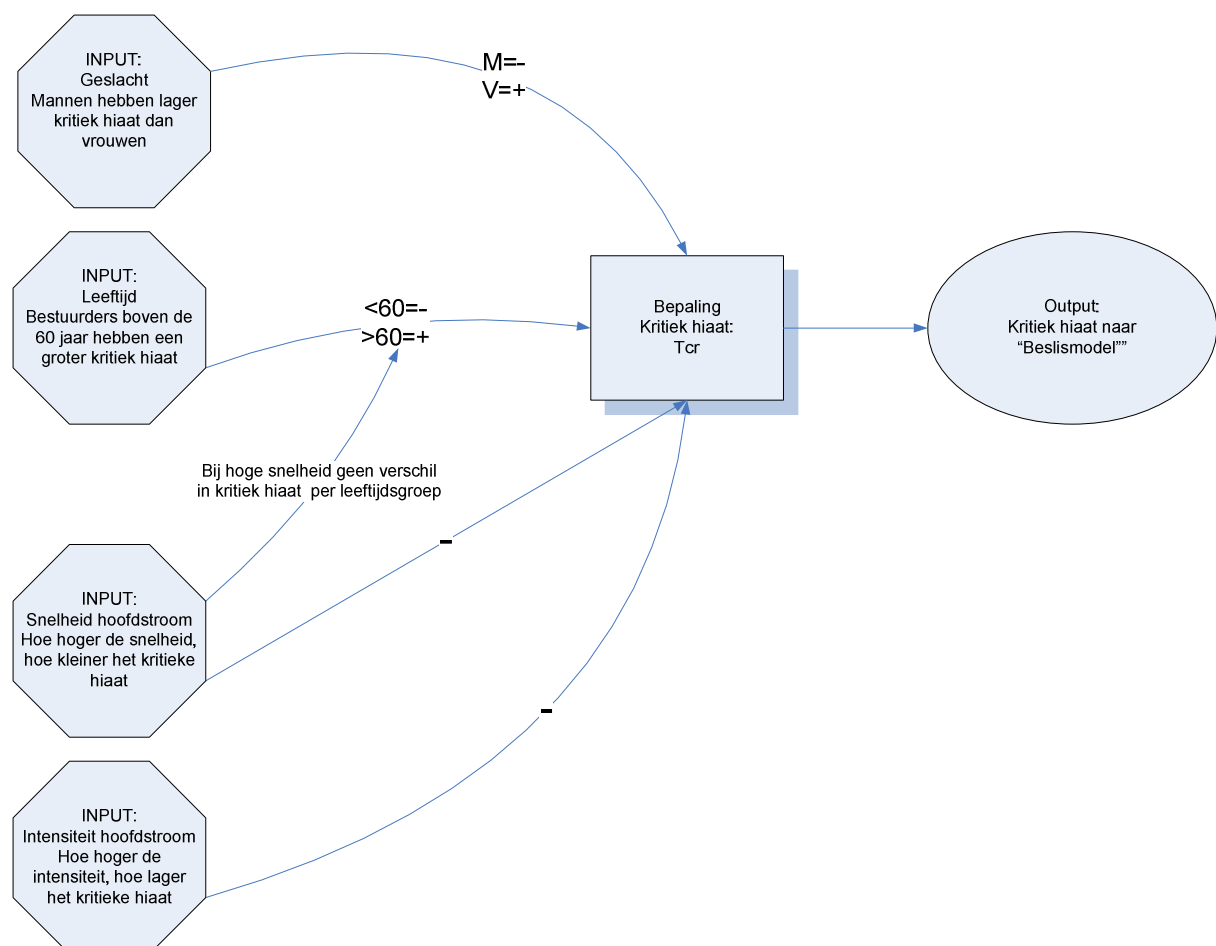
Het bestaande hiaatacceptatiemodel in MARS is gebaseerd op één kritiek hiaat voor alle bestuurders. Het model neemt alleen het eerste hiaat in de verkeersstroom in de beslissing van de bestuurder mee. Dit kan worden uitgebreid door de hiaatacceptatie van de bestuurder te baseren op meerdere hiaten, zodat de verkeersstroom wordt meegenomen in de beslissing.

## Hoofdstuk 4 Het conceptuele model

In hoofdstuk 2 zijn vijf invloedsfactoren gekozen die meegenomen worden in de bepaling van het kritieke hiaat. De zesde factor “Meerdere hiaten in beslissing” wordt opgenomen in het hiaatacceptatiemodel van het kritieke hiaat. De twee onderdelen vormen samen het conceptuele model van de hiaatacceptatie. In het eerste onderdeel wordt de samenhang tussen de vijf invloedsfactoren op het kritieke hiaat gepresenteerd. In het tweede onderdeel wordt met dit kritieke hiaat het hiaatacceptatiemodel uitgewerkt dat meerdere hiaten in de beslissing van de bestuurder meeneemt.

### 4.1 De bepaling van het kritiek hiaat

Van vijf factoren is bekend welke invloed ze hebben op het kritieke hiaat en daarmee op de hiaatacceptatie. Eén interactie is gevonden tussen de leeftijd en de snelheid in de hoofdstromen. In figuur 4-1 zijn de factoren in een model gezet en de invloeden op het kritieke hiaat.



Figuur 4-1 Invloedsfactoren kritiek hiaat

Op basis van de geraadpleegde literatuur zijn de invloeden van de vijf factoren op het kritieke hiaat alleen bekend in orde van grootte. Hierdoor kan binnen dit onderzoek geen gedetailleerd kwantitatief model opgesteld worden, dat de relaties precies weergeeft. Vervolgonderzoek moet nog uitwijzen of

het mogelijk is om de processen in bestuurders die tot hun rijgedrag leiden, precies zijn te achterhalen en te modelleren.

Vanwege het vernieuwende karakter van het onderzoek en de haalbaarheid om tot een implementatie te komen zal de focus in de implementatie binnen dit onderzoek liggen bij het meenemen van meerdere hiaten in de beslissing van de bestuurder. De invloed van de factoren zal worden gerepresenteerd door één kansverdeling van het kritieke hiaat. Op deze manier wordt voor variatie tussen de bestuurders gezorgd. In vervolgonderzoek kunnen meerdere verdelingen per invloedsfactor worden opgesteld of zelfs een kwantitatief model opgezet worden als er gedetailleerde gegevens beschikbaar zijn over het rijgedrag van bestuurders.

## **4.2 *Uitwerking van meerdere hiaten in de beslissing***

In de uitwerking van het nieuwe hiaatacceptatiemodel is het volgende uitgangspunt gehanteerd: een hiaat langer dan het kritieke hiaat wordt geaccepteerd, tenzij één van de volgende hiaten veel aantrekkelijker is. Maar de aantrekkelijkheid van een hiaat wordt beperkt als het hiaat nog ver in de verkeersstroom ligt.

De aantrekkelijkheid van een hiaat is gebaseerd op de lengte van het hiaat in seconden ten opzichte van het kritieke hiaat. Door een langer hiaat te kiezen is er meer tijd beschikbaar om de manoeuvre uit te voeren. Het kritieke hiaat wordt afgetrokken van het hiaat in de verkeersstroom. In formule (4-1) staat de aantrekkelijkheid weergegeven, met  $T_{gi}$  de lengte van het hiaat  $i$  en  $T_{cr}$  het kritieke hiaat.

$$\text{Aantrekkelijkheid}_{\text{hiaat}}_{T_{gi}} = T_{gi} - T_{cr} \quad (4-1)$$

Een hiaat dat nog ver in de verkeersstroom ligt is minder aantrekkelijk dan een hiaat dichtbij de bestuurder. Dit komt doordat het hiaat moeilijker in te schatten is door bestuurders en dat het nog lang kan duren voor dat de bestuurder in het hiaat kan invoegen. Daarnaast kan een hiaat nog veranderen als het ver weg is. Daarom wordt de aantrekkelijkheid van een hiaat beperkt door de positie van het hiaat in de verkeersstroom. Een weegfactor gekoppeld aan het volgnummer van het hiaat weegt het hiaat. De eerste vier gecombineerde hiaten kunnen een weegfactor krijgen. De hiaten in de verkeersstroom met een groter volgnummer krijgen een weegfactor van 0 mee. De weegfactoren worden tussen 0 en 1 gesteld. Een weegfactor van 1 betekent dat de aantrekkelijkheid van het hiaat volledig wordt meegenomen in de beslissing. In tabel 4-1 is een voorbeeld gegeven van een set van weegfactoren, waarbij elk hiaat verderop in de verkeersstroom de helft aantrekkelijker is. Het hiaatacceptatiemodel met één hiaat is weergegeven in de derde kolom van tabel 4-1.

Tabel 4-1 Voorbeeld van weegfactoren

| Hiaatvolgnummer i | Model met 4 hiaten Weegfactor $cf_i$ | Model met 1 hiaat Weegfactor $cf_i$ |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1                 | 1                                    | 1                                   |
| 2                 | 0,5                                  | 0                                   |
| 3                 | 0,25                                 | 0                                   |
| 4                 | 0,125                                | 0                                   |

De weegfactor,  $cf_i$ , wordt vermenigvuldigd met de aantrekkelijkheid van het hiaat, zie formule (4-2).

De score die daaruit volgt is weergegeven in formule (4-2).

$$Score\_T_{gi} = (T_{gi} - T_{cr}) * cf_i \quad (4-2)$$

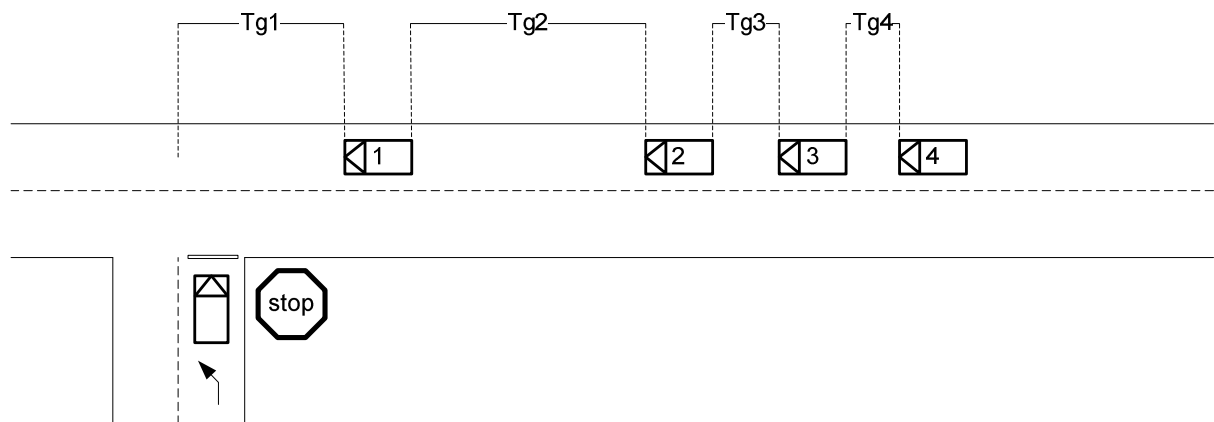
Elk hiaat krijgt een score. Met de score is het volgende beslismodel opgesteld.

Beslismodel:

Accepteer  $T_{g1}$  als  $Score\_T_{g1}$  maximaal en positief is uit de verzameling  $Score\_T_{gi}$  anders weiger  $T_{g1}$ .

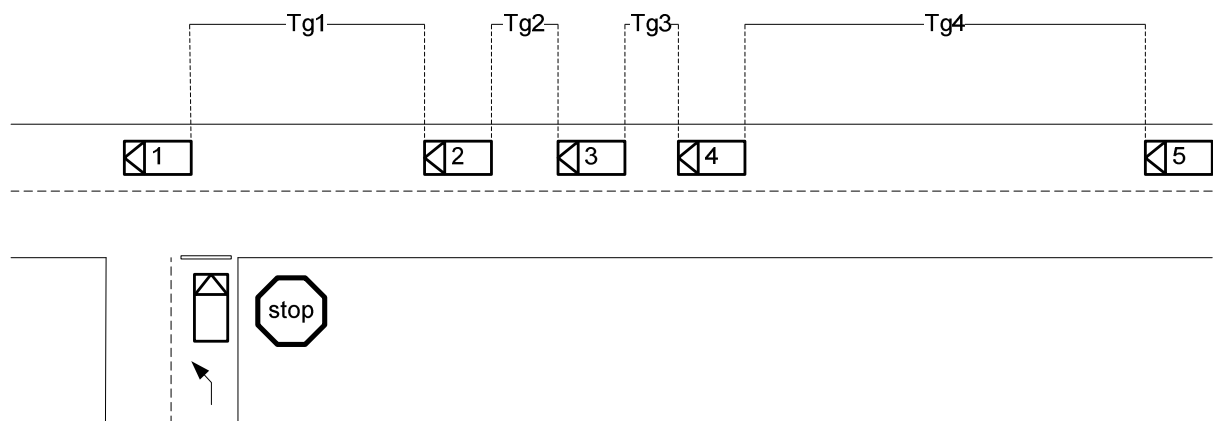
Als het eerste hiaat in de rij is afgewezen en voorbij de bestuurder is, schuiven de volgnummers van de hiaten op.

In onderstaand voorbeeld is aangenomen dat er alleen verkeer in de hoofdstroom van rechts is. Het kritieke hiaat van de links afslaande bestuurder is 5,1 seconden. De verkeersstroom is in figuur 4-2 en figuur 4-3 op twee momenten weergegeven. Moment 2 volgt op moment 1 met het verschil dat het eerste voertuig nu voorbij de bestuurder is gereden. Daarmee heeft het hiaat tussen voertuig 1 en 2 het hiaatvolgnummer 1 gekregen en de bijbehorende weegfactor. De overige hiaten zijn ook opgeschoven.



Figuur 4-2 Voorbeeld: werking meerdere hiaten moment 1





Figuur 4-3 Voorbeeld: werking meerdere hiaten moment 2

In tabel 4-2 en tabel 4-3 staan de bijbehorende scores van het beslismodel.

Tabel 4-2 Voorbeeld: scores tijdens moment 1

| Kritiek hiaat (s) | Hiaat lengte(s) | Hiaat nummer | Weeg factor | Score  |
|-------------------|-----------------|--------------|-------------|--------|
| 5,1               | 5,2             | 1            | 1           | 0,1    |
|                   | 7,5             | 2            | 0,5         | 1,2    |
|                   | 2,2             | 3            | 0,25        | -0,73  |
|                   | 1,8             | 4            | 0,125       | -0,413 |

Tabel 4-3 Voorbeeld: scores tijdens moment 2

| Kritiek hiaat (s) | Hiaat lengte(s) | Hiaat nummer | Weeg factor | Score |
|-------------------|-----------------|--------------|-------------|-------|
| 5,1               | 7,5             | 1            | 1           | 2,4   |
|                   | 2,2             | 2            | 0,5         | -1,5  |
|                   | 1,8             | 3            | 0,25        | -0,83 |
|                   | 15              | 4            | 0,125       | 1,238 |

Uit tabel 4-2 blijkt dat het tweede hiaat wordt gekozen. Op moment 1 is het eerste hiaat van 5,2 seconden net voldoende, maar het tweede hiaat is langer en daarmee aantrekkelijker. Tijdens moment 2 is het vierde hiaat twee keer zo lang als het eerste hiaat. Door de kleine weegfactor wordt dit vierde hiaat niet gekozen.

### **4.3 Conclusies**

In het conceptuele model zijn de vijf invloedsfactoren op het kritieke hiaat, leeftijd en geslacht van bestuurder, snelheid in de hoofdstroom, intensiteit in de hoofdstroom en het interactie-effect tussen snelheid en leeftijd weergegeven zoals deze zijn beschreven in hoofdstuk 2. Om de precieze relatie tussen de factoren en het kritieke hiaat te kunnen weergeven zijn gedetailleerde gegevens nodig. Deze gegevens zijn niet in voldoende mate beschikbaar. Daarom is gekozen om de invloeden met behulp van één kansverdeling van het kritieke hiaat te bepalen.

Het nieuwe hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing is gepresenteerd. In het model wordt de aantrekkelijkheid van een hiaat in de verkeersstroom meegenomen. De aantrekkelijkheid is gebaseerd op de lengte van het hiaat ten opzichte van het kritieke hiaat en de positie van het hiaat in de verkeersstroom. Aan de hand van de positie in de verkeersstroom zijn weegfactoren voor de hiaten opgesteld die de aantrekkelijkheid beperken. Hoe verder een hiaat in de verkeersstroom is, hoe minder aantrekkelijk het hiaat is. Dit resulteert in een score per hiaat en het hiaat met de hoogste score wordt door de bestuurder gekozen.

Het hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing staat vanwege het vernieuwende karakter centraal in de implementatie. Een beslissing op basis van de verkeersstroom in plaats van alleen de eerste mogelijkheid sluit meer aan bij het idee hoe bestuurders een kruising oversteken. In de implementatie en simulatie kan getoond worden welke veranderingen er ontstaan in resultaten tussen het nieuwe model en het bestaande hiaatacceptatiemodel.

## Hoofdstuk 5      Implementatie van het conceptuele model

---

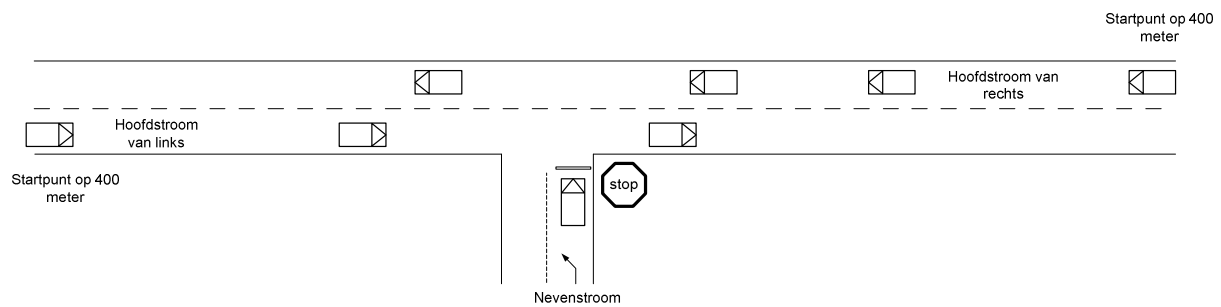
In dit hoofdstuk wordt de implementatie behandeld van het conceptuele model in de simulatieomgeving MARS. Aannames zijn gedaan om het hiaatacceptatiemodel te implementeren in MARS en om invloeden van het nieuwe model zuiver te kunnen bepalen. De aannames hebben betrekking op het rijgedrag van de bestuurder en het rijgedrag van de hoofdstroombestuurders. De uiteindelijke implementatie is uitgevoerd zoals in dit hoofdstuk is beschreven. Vanuit het conceptuele model en de aannames is een diagram opgebouwd met de functies en relaties. Dit statediagram heeft als basis gediend voor de implementatie van het model in MARS. De invoer en uitvoer van het simulatiemodel wordt beschreven. Het hoofdstuk besluit met een conclusie over de implementatie.

### **5.1   *Afgeleide veiligheidsindicatoren en wachttijd als vergelijkingscriteria***

Om veranderingen te kunnen constateren tussen het hiaatacceptatiemodel met één hiaat in de beslissing en het model met meerdere hiaten in de beslissing moeten criteria gekozen worden. De instellingen van het hiaatacceptatiemodel worden vergeleken op de afgeleide veiligheidsindicatoren minimale time-to-collision (TTC) en post-encroachment-time (PET). Deze indicatoren maken uitspraken over de verkeersveiligheid mogelijk. De wachttijd van een bestuurder wordt gebruikt als criterium voor de verkeersafwikkeling van het kruispuntmodel. De wachttijd is gedefinieerd als de tijd die verstrijkt tussen het moment van plaatsing van het voertuig bij de kruising tot het moment van gas geven om in het geaccepteerde hiaat te rijden. De wachttijd is als criterium genomen omdat het niet te verwachten valt dat een veel langere wachttijd in de simulaties bij bestuurders in het echt zal voor komen. Een bestuurder zal dan waarschijnlijk een hiaat opeisen en zich er tussen wringen.

### **5.2   *Verkeerssituatie op de T-kruising***

De beslissing van de links afslaande bestuurder is uitgewerkt in een STOP-situatie op een T-kruising, zie figuur 5-1. De bestuurder in de nevenstroom moet stoppen en voorrang verlenen aan de voertuigen in de verkeersstroom. Dit betekent dat het voertuig een snelheid heeft van 0 km/u op het moment van beslissen. Vanaf het moment dat de bestuurder stil staat, start het hiaatacceptatiemodel en beoordeelt de bestuurder de verkeerssituatie. De T-kruising ligt binnen de bebouwde kom en er geldt een maximum snelheid van 50 km/u. De bestuurder heeft vrij zicht op beide hoofdstromen. De bestuurder kan de posities en snelheden van de voertuigen op de hoofdstromen perfect beoordelen. Verkeerde inschattingen en bewuste overtredingen van bestuurders worden niet gemodelleerd. Vanwege de grote mate van complexiteit wordt langzaam verkeer niet gemodelleerd. De voertuigen van zowel bestuurders als hoofdstroombestuurders zijn personenvoertuigen en hebben allemaal dezelfde voertuigspecificaties.



*Figuur 5-1 Situatie T-kruising*

### 5.2.1 Afbakening van de verkeerssituatie

Om het nieuwe hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing te kunnen vergelijken met het model met één hiaat in de beslissing is gekozen om een aantal verstorende effecten uit te schakelen. Eén van deze effecten is een variatie in snelheid van de voertuigen in de verkeersstroom. De bestuurder gaat er in de beslissing vanuit dat voertuigen in de hoofdstromen een vaste snelheid van 50 km/u aanhouden. Een ander verstorend effect is het afslaan van hoofdstroombestuurders naar de nevenstroom. In de implementatie slaan hoofdstroombestuurders niet af naar de nevenstroom. De hoofdstroombestuurders van rechts en van links reageren op het overstekende nevenstroomvoertuig volgens een bestaand voertuigvolgmodel in MARS.

Een hiaat in een hoofdstroom wordt bepaald vanaf het midden van de kruising tot de voorkant van het eerste voertuig en tussen de achterkant en voorkant van twee voertuigen. De bestuurder combineert de hiaten in de hoofdstroom van rechts en links tot één hiaat dat wordt geëvalueerd in het hiaatacceptatiemodel. In de combinatie worden de hiaten in de hoofdstroom van rechts en links even zwaar meegewogen. Geen rekening wordt gehouden met het feit dat de bestuurder er langer over doet om de hoofdstroom van rechts te bereiken.

De verkeersveiligheidseffecten worden alleen bepaald tussen het overstekende voertuig en de eerst opkomende voertuigen in de twee hoofdstromen. Eventuele kop-staart conflicten stroomopwaarts in beide hoofdstromen worden niet meegenomen. Door de constante snelheid van de hoofdstroombestuurders is het niet noodzakelijk om naast de minimale TTC en PET een extra afgeleide veiligheidsindicator te berekenen om de impact van het conflict mee te nemen als het tot een ongeval zou zijn gekomen.

## 5.3 Aannames in het hiaatacceptatiemodel

De invloedsfactoren op het kritieke hiaat worden door één kansverdeling van het kritieke hiaat gerepresenteerd. Alle bestuurders krijgen op basis van deze kansverdeling een kritiek hiaat toegekend. Op deze wijze kan inzicht worden verkregen in de invloed van verschillende kritieke hiaten uit de verdeling en de werking van het beslismodel op de invoeggedragingen van bestuurders.

Het kritieke hiaat wordt per bestuurder als invoerparameter gegeven aan het simulatiemodel. Dit biedt de mogelijkheid om als gebruiker van het model zelf de vorm van de kansverdeling te bepalen en aan

te passen. De trekking van het kritieke hiaat uit de kansverdeling wordt vóór elke simulatie uitgevoerd tijdens het maken van de invoerbestanden.

#### **5.4 Aannames in het rijgedrag van de bestuurder**

Door de keuze van een nieuwe implementatie is het kruispuntmodel opnieuw opgebouwd in MARS. Dit resulteerde in aannames ten aanzien van het overige rijgedrag van de bestuurder naast het hiaatacceptatiegedrag. De aannames zijn gedaan omdat het optrekgedrag van de bestuurders grote invloed heeft op de uitkomsten van de posities van de voertuigen en de uitkomsten van het simulatiemodel.

Om het gedrag en de implementatie overzichtelijk te houden is de keuze gemaakt het rijgedrag voor elke bestuurder constant te houden. De beschreven aannames gelden daarmee voor elke bestuurder. In vervolgonderzoek kan het overige rijgedrag per bestuurder verschillend worden geïmplementeerd, waardoor meer variatie tussen de bestuurders ontstaat. Dat kan bijdragen aan een meer natuurgetrouw rijgedrag.

##### **5.4.1 Beslissingsmoment en start van de manoeuvre**

Het moment dat de bestuurder een beslissing neemt om de kruising over te steken is bepaald. Daarnaast is vastgelegd hoelang een bestuurder doet over deze beslissing.

In een taakanalyse naar verkeersgedrag op kruisingen wordt gesproken over de taak 'hiaat accepteren' met twee subtaken: de evaluatie van het hiaat en de start van de manoeuvre (Laberge *et al.*, 2006). Uitsluitel over het moment en duur van beide processen wordt in dat onderzoek niet gegeven. Het blijkt erg lastig om te bepalen wanneer bestuurders hun beslissing nemen.

##### **Beslissingsmoment**

Er is geen onderzoek beschikbaar dat uitsluitel geeft over het moment waarop een bestuurder zijn beslissing neemt om een hiaat te accepteren. Een implementatie zou kunnen zijn dat de beslissing continu wordt gemaakt, dat wil zeggen elke simulatietijdstap. Hier kleven nadelen aan, omdat een bestuurder niet op elk moment een beeld kan hebben van de verkeersstroom. Een implementatie dat bij elk hiaat een besluit wordt genomen lijkt ook niet erg valide, omdat verwacht wordt dat vaker dan éénmaal per hiaat een beslissing valt. De aanname dat de beslissing op een vast interval wordt genomen lijkt een redelijk compromis dat valt te implementeren in het model.

##### **Beslissingsduur**

In de beslissingsduur zitten verschillende onderdelen verwerkt. De bestuurder observeert het verkeer, evalueert het hiaat en gaat over tot uitvoering van de beslissing (Laberge *et al.*, 2006). De tijdsduur voor deze stappen kan tussen bestuurders variëren en kan met veel verschillende factoren samenhangen.

Een tijd van 2,8 seconden is gehanteerd vanaf het moment dat het voertuig bij de stopstreep staat tot het moment van gaspedaal intrappen (Koppa, 1999). Bij deze tijd wordt er vanuit gegaan dat de

bestuurder voorafgaand aan de stop geen informatie heeft verwerkt over de te kruisen stroom. Gedurende deze 2,8 seconden wordt het verkeer geobserveerd, de beslissing genomen en dan de manoeuvre ingezet.

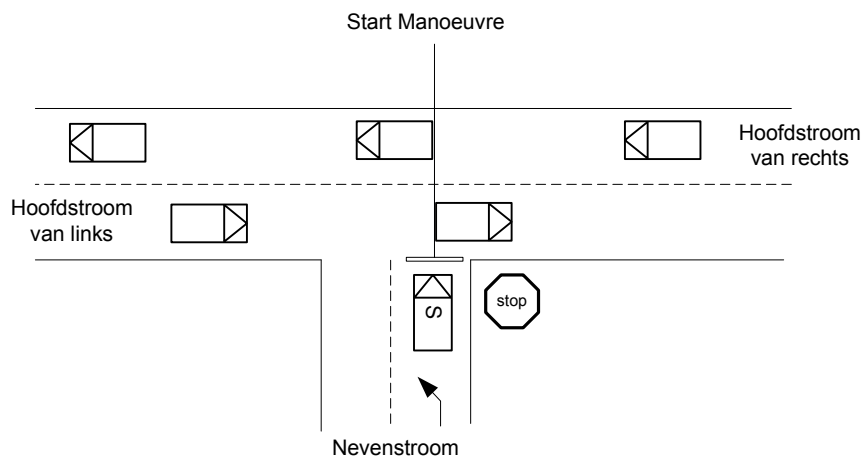
Bij weigering van het eerste hiaat bestaat al een beeld van de verkeersstroom en kan worden gewerkt met een kortere beslissingsduur. In een studie naar reactietijden in het verkeer wordt voor een simpele situatie een reactietijd tussen de 0,75 en 1,5 seconden aangehouden (Olson, 2002). In deze studie is voor de beslissingsduur van volgende hiaten een tijd aangehouden van 1 seconde.

### Start van de manoeuvre

Naast de tijdsduur en moment van de beslissing is bepaald op welk moment de bestuurder daadwerkelijk weg rijdt. De start van de manoeuvre wordt bepaald door het moment van gas geven.

Er is weinig kennis beschikbaar over de start van de manoeuvre. De start van de manoeuvre hangt waarschijnlijk ook samen met veel factoren onder andere bestuurders- en voertuigkenmerken. Daarnaast kan de start van de manoeuvre afhangen van welke hoofdstroom beperkend is voor het gekozen hiaat. De hoofdstroom van links ligt namelijk dichterbij dan de hoofdstroom van rechts. Dit onderscheid is in dit onderzoek niet gehanteerd.

De manoeuvre start als de achterkant van het voertuig op de hoofdstroom, waarmee het gekozen hiaat begint, voorbij de lijn loodrecht op het midden van het nevenstroomvoertuig is. Zie figuur 5-2 voor een schematische weergave.



Figuur 5-2 Start manoeuvre

### Implementatie van beslissingsmoment, beslissingsduur en start van de manoeuvre

Beslissingsmoment, beslissingsduur en start van de manoeuvre zijn als volgt geïmplementeerd. Op tijdstip  $t$  wordt een nevenstroomvoertuig geplaatst op de kruising. Na 2,8 seconden wordt de eerste beslissing door de bestuurder genomen. Wordt het eerste hiaat geweigerd, dan volgt één seconde later weer een beslissing. Wordt het tweede hiaat geaccepteerd, (wat alleen het geval is bij meerdere hiaten in het beslissingsproces) én het begrenzend hoofdstroomvoertuig van het hiaat is binnen 1

seconde voorbij het nevenstroomvoertuig, dan wordt de beslissing meteen gemaakt nadat de achterkant van het begrenzend hoofdstroomvoertuig voorbij is.

Mocht op het moment van beslissing een hoofdstroomvoertuig zich recht voor het nevenstroomvoertuig bevinden dan wordt de beslissing opnieuw gemaakt als het hoofdstroomvoertuig net voorbij het nevenstroomvoertuig is.

Uit visuele testen is gebleken dat het moment van gas geven in een aantal situaties eerder kan starten. De reactie van de bestuurder lijkt traag, wat mede wordt veroorzaakt door de afstand van het midden van het bestuurdersvoertuig en het midden van de kruising. De bestuurder zou al eerder kunnen beginnen met optrekken als een hiaat wordt ingereden. Er is geen aanpassing gedaan voor dit gedrag, omdat meer onderzoek nodig is om een gefundeerd beslissingsmechanisme op te stellen.

#### 5.4.2 Acceleratie door de bestuurder

De bestuurder moet optrekken met een acceleratie nadat een hiaat geaccepteerd en het moment van starten bepaald is. Het is van belang dat de acceleratie goed wordt berekend, omdat het mede de uitkomst bepaalt van de afgeleide veiligheidsindicatoren.

#### Achtergrond

Uit rijsimulatoronderzoek van Yan *et al.* (2007) blijkt dat de links afslaan manoeuvre met een grotere acceleratie wordt uitgevoerd als het geaccepteerde hiaat korter wordt. Een veldstudie van McDowell *et al.* (1983) geeft ook aan dat een negatief verband bestaat tussen de lengte van het gekozen hiaat en de grootte van de acceleratie. Bestuurders rijden sneller in een kort geaccepteerd hiaat. Naast de lengte van het gekozen hiaat hebben ook hier bestuurders- en voertuigkenmerken een grote invloed op de acceleratie.

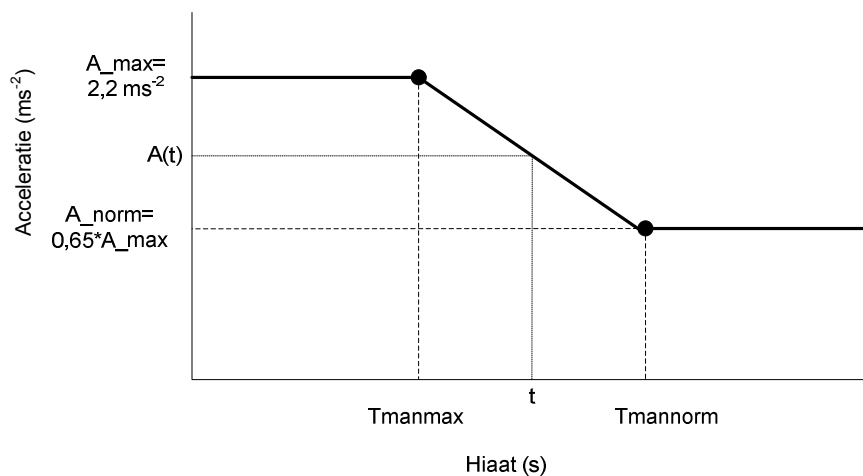
Het is moeilijk te onderzoeken of een bestuurder een hiaat accepteert en daar een acceleratie bij kiest of dat een bestuurder uitgaat van een acceleratie en mede op basis daarvan een hiaat accepteert. In deze studie is gekozen voor een uitwerking waarbij een bestuurder een hiaat accepteert en daarop zijn acceleratie baseert. Dit lijkt de meest logische redenatie en valt te implementeren in het model. Er wordt gewerkt met een vaste acceleratie gedurende de gehele manoeuvre om de acceleratie niet te complex te maken. Ondanks dat Wang *et al.* (2004) beschrijven dat bij de start van een manoeuvre een grotere acceleratie aangehouden wordt dan bij het eind van de manoeuvre.

Onder normale rijcondities waarbij geen sprake van haast is, ligt de gemiddelde versnelling op 65% van de maximale versnelling van het voertuig (Glauz en Harwood, 1999). Een maximale gemiddelde acceleratie van  $2,2 \text{ ms}^{-2}$  wordt door voertuigen in de praktijk nauwelijks gehaald (Glauz en Harwood, 1999). Bij een maximale versnelling  $2,2 \text{ ms}^{-2}$  ligt de normale gemiddelde versnelling (65%) op  $1,43 \text{ ms}^{-2}$ . In veldonderzoeken naar de acceleratie van voertuigen die links afslaan in een verkeersstroom vanaf een stopbord is een gemiddelde acceleratie gevonden van  $1,49 \text{ ms}^{-2}$  (Harwood *et al.*, 2000) en

$1,41 \text{ ms}^{-2}$  (Chandrasekhar en Bahm, 2007). In de implementatie wordt de maximale gemiddelde versnelling van  $2,2 \text{ ms}^{-2}$  aangehouden en de normale gemiddelde versnelling van  $1,43 \text{ ms}^{-2}$ .

### Implementatie van het acceleratiegedrag

Het uitgangspunt voor de acceleratie is als volgt. De bestuurder accelereert maximaal bij een kort gekozen hiaat en accelereert normaal bij een lang geaccepteerd hiaat. Een bestuurder kiest een versnelling aan de hand van het gekozen hiaat volgens figuur 5-3. Vier punten leggen het verband vast. Als een bestuurder een hiaat van lengte  $t$  kiest, dan zal daar een versnelling  $A(t)$  bij horen volgens onderstaande figuur.  $T_{\text{manmax}}$  is de manoeuvreertijd bij een maximale versnelling en de uitwerking van een kort hiaat.  $T_{\text{mannorm}}$  is de manoeuvreertijd bij een normale versnelling en is de uitwerking van een lang hiaat.



Figuur 5-3 Bepaling acceleratie

Beide manoeuvreertijden zijn gebaseerd op de tijd die het kost om de manoeuvre uit te voeren. De manoeuvre wordt begrensd door het intrappen van gaspedaal en het moment dat de bestuurder een snelheid heeft bereikt van  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Vergeleken met de kruissnelheid van de overige voertuigen van  $13,89 \text{ ms}^{-1}$  (50 km/u) komt dit goed in de buurt. Een manoeuvreertijd tot de volledige kruissnelheid duurt te lang, omdat het voertuigvolgmodel steeds langzamer accelereert naarmate het dichterbij de kruissnelheid komt.

Om tot de twee manoeuvreertijden te komen bij deze T-kruising zijn simulaties uitgevoerd. Een deel van de versnelling in de manoeuvre wordt uitgerekend door het versnellingsmodel tijdens de bocht, een ander deel door het voertuigvolgmodel op de hoofdstroom van rechts. Twee proefsimulaties zijn uitgevoerd om de manoeuvreertijden te verkrijgen. Daaruit bleek dat  $T_{\text{manmax}}$  ( $a = 2,2 \text{ ms}^{-2}$ ) = 5,1 seconden en  $T_{\text{mannorm}}$  ( $a = 1,43 \text{ ms}^{-2}$ ) = 6,8 seconden. Deze parameterwaarden zijn geprogrammeerd in de code en kunnen niet via een invoerbestand gewijzigd worden.

In vervolgonderzoek kan een complexer verband gebruikt worden voor de bepaling van de acceleratie. Zo kan de maximale acceleratie per voertuig en bestuurder ingesteld worden. Een koppeling met het kritieke hiaat is ook een mogelijkheid om de acceleratie meer natuurgetrouw te



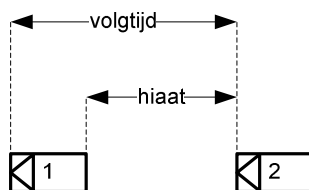
maken. Het is namelijk voor te stellen dat bij een gelijk geaccepteerd hiaat een bestuurder met een kort kritiek hiaat een grotere acceleratie zal hanteren dan een bestuurder met een lang kritiek hiaat.

## 5.5 Aannames in het verkeer in de hoofdstromen

Het verkeer op de twee hoofdstromen heeft een belangrijke functie in de hiaatacceptatie. De bestuurder moet in de gecombineerde hoofdstromen een mogelijkheid vinden om links af te slaan op de T-kruising. Zowel de volgtijden van de voertuigen als de hoeveelheid verkeer op de hoofdstroom hebben invloed op het beslissingsgedrag van de bestuurder. Samen vormen ze de hiaten in de hoofdstroom. Daarnaast hebben het voertuigvolggedrag en de reactie van de hoofdstroomvoertuigen invloed op de vorming van de afgeleide veiligheidsindicatoren.

### 5.5.1 Volgtijden in de hoofdstromen

De volgtijden worden gedefinieerd als het tijdsverschil tussen de voorkant van een voertuig en de voorkant van een volgend voertuig, zie figuur 5-4. Er moet variatie komen in de volgtijden van de voertuigen in de hoofdstromen. Dit kan worden bereikt door een kansverdeling van de volgtijden te gebruiken.



Figuur 5-4 Definitie van de volgtijd en het hiale

De aankomst van verkeer en de mogelijkheid dit aankomstproces te vatten in een kansverdeling heeft veel aandacht gekregen in de literatuur. Troutbeck en Brilon (1999) bevat een overzicht gegeven van mogelijke verdelingen voor volgtijden van voertuigen in de hoofdstroom.

Een veel gebruikte verdeling is de exponentiële verdeling. Deze is gebaseerd op de aanname dat elk voertuig willekeurig aankomt onafhankelijk van de aankomst van het vorige voertuig. Daarmee zijn de hiaten bij de stopstreep ook willekeurig. Een verplaatste exponentiële verdeling wordt vaak gebruikt om te zorgen dat geen volgtijden van 0 seconden ontstaan. Een nadeel aan deze verdelingen is dat het aantal korte volgtijden wordt overschat bij hogere intensiteiten (Troutbeck en Brilon, 1999).

Een verdeling met meer parameters of een combinatie van verdelingen geeft volgens Reijmers (2006) meer mogelijkheden om volgtijden uit de realiteit op een betere manier te benaderen. Een verdeling met meerdere parameters is bijvoorbeeld de Erlang-k verdeling. De Erlang-k verdeling is een convolutie van k exponentiële verdelingen.

Een combinatie van meerdere verdelingen geeft de mogelijkheid de volgtijden te beschrijven van voertuigen in colonnes en zogenaamde vrije voertuigen. Een combinatie van twee Erlang-2 verdelingen beschrijft de voertuigvolgtijden van enkele verkeersstromen in een stedelijke omgeving het best (Van Arem, 1986). Een ander voorbeeld is de hyper-erlang verdeling, een combinatie van de

Erlang verdeling en de verplaatste exponentiële verdeling. De gecombineerde verdelingen zijn de meest realistische, maar ook de meest ingewikkelde verdelingen (Troutbeck en Brilon, 1999).

In dit onderzoek is gekozen voor een Erlang-2 verdeling voor de volgtijden van de voertuigen op twee hoofdstromen. Een afweging is gemaakt tussen de mate van spreiding van de volgtijden en de complexiteit van de verdelingen. Daarbij zorgt een Erlang-2 verdeling voor lange hiaten in de verkeersstroom ten opzichte van de negatief exponentiële verdeling. Door het gebruik van de Erlang-2 verdeling wordt een spreiding aangebracht in de volgtijden van het verkeer.

Om er voor te zorgen dat voertuigen niet zeer vlak achter elkaar rijden wordt een minimale volgtijd van 1 seconde aangehouden. Daarnaast zijn volgtijden onder de 1 seconde niet interessant voor de hiaatacceptatie, deze zullen namelijk altijd geweigerd worden. Alle waarden uit de voertuigvolgtijdverdeling onder de 1 seconde worden op 1 seconden gezet. In Bijlage A staat beschreven hoe de Erlang-2 verdeling is geïmplementeerd in Excel voor de invoerbestanden.

### 5.5.2 Intensiteit van het verkeer in de hoofdstroom

De intensiteit van het verkeer op de hoofdstroom dient als invoer voor de voertuigvolgtijdverdeling en bepaalt voor een deel de lengte van de hiaten in de hoofdstroom. De hoeveelheid verkeer per hoofdstroom kan worden gevarieerd als invoerparameter van de voertuigvolgtijdverdeling.

### 5.5.3 Het voertuigvolgmodel van de hoofdstroom

In dit onderzoek is de snelheid op de hoofdstroom constant gehouden om de vergelijking tussen het model met één hiaat en met meerdere hiaten in de beslissing op een overzichtelijke manier te kunnen maken. Om de snelheid constant te houden moeten hoofdstroombestuurders niet op hun voorganger reageren maar wel op het invoegende voertuig. Op deze manier zijn de afgeleide veiligheidsindicatoren en de wachttijd goed te vergelijken tussen de experimenten. Omdat het voertuigvolgmodel van de hoofdstroom geen onderwerp van dit onderzoek is, is gekozen voor een voertuigvolgmodel dat al in MARS is geïmplementeerd. Het voertuigvolgmodel is het advanced cruise control algoritme, dat is gebruikt in het IRSA project van TNO (Van Arem *et al.*, 2007). Dit algoritme is ontwikkeld voor voertuigen op snelwegen. In het algoritme ontbreekt de reactietijd van de hoofdstroombestuurders. Hierdoor reageren hoofdstroombestuurders direct op een verandering in de omgeving, terwijl in realiteit bestuurders tijd nodig hebben om een beslissing te nemen.

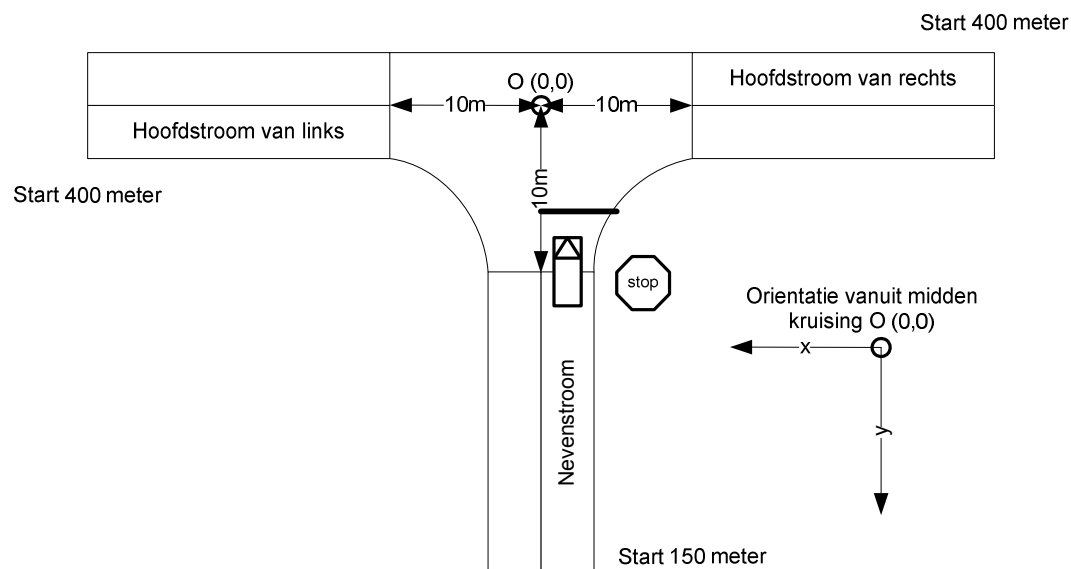
De opzet is om het voertuigvolgmodel in de situatie van de T-kruising te gebruiken met aanpassingen aan de parameterwaarden. De resultaten zijn visueel en via de logfiles van het simulatiemodel geverifieerd. Het voertuigvolgmodel is ingesteld zodat de volgtijd uit de verdeling en de snelheid van 50 km/u van de hoofdstroomvoertuigen constant blijven gedurende het rijden in de hoofdstroom. De hoofdstroombestuurders reageren op een invoegend of kruisend nevenstroomvoertuig door te remmen indien dat nodig is.

In het voertuigvolgmodel is de gevoeligheid voor het snelheidsverschil tussen een hoofdstroombestuurder van links en het links afslaande voertuig aangepast. Het bleek namelijk dat deze hoofdstroombestuurders zeer fors afremden op een grote afstand van de kruising in reactie op een links afslaand nevenstroomvoertuig. Hoofdstroombestuurders van rechts vertoonden dit gedrag niet. Met de aanpassing en de gekozen instellingen voorziet het geïmplementeerde voertuigvolgmodel redelijk natuurlijk remgedrag voor de hoofdstroombestuurders.

In het voertuigvolgmodel kon één beperking niet opgelost worden met andere parameterinstellingen. De hoofdstroombestuurder reageert pas op het links afslaande voertuig als het midden van het nevenstroomvoertuig op de rijbaan is van de hoofdstroombestuurder. In de simulaties reageert de hoofdstroombestuurder daardoor aan de late kant op het links afslaande voertuig, waardoor de afgeleide veiligheidsindicatoren lagere waarden kunnen krijgen dan wanneer de reactie wel goed is gemodelleerd. De verkeersveiligheid kan hierdoor worden onderschat.

#### 5.5.4 Configuratie van de T-kruising

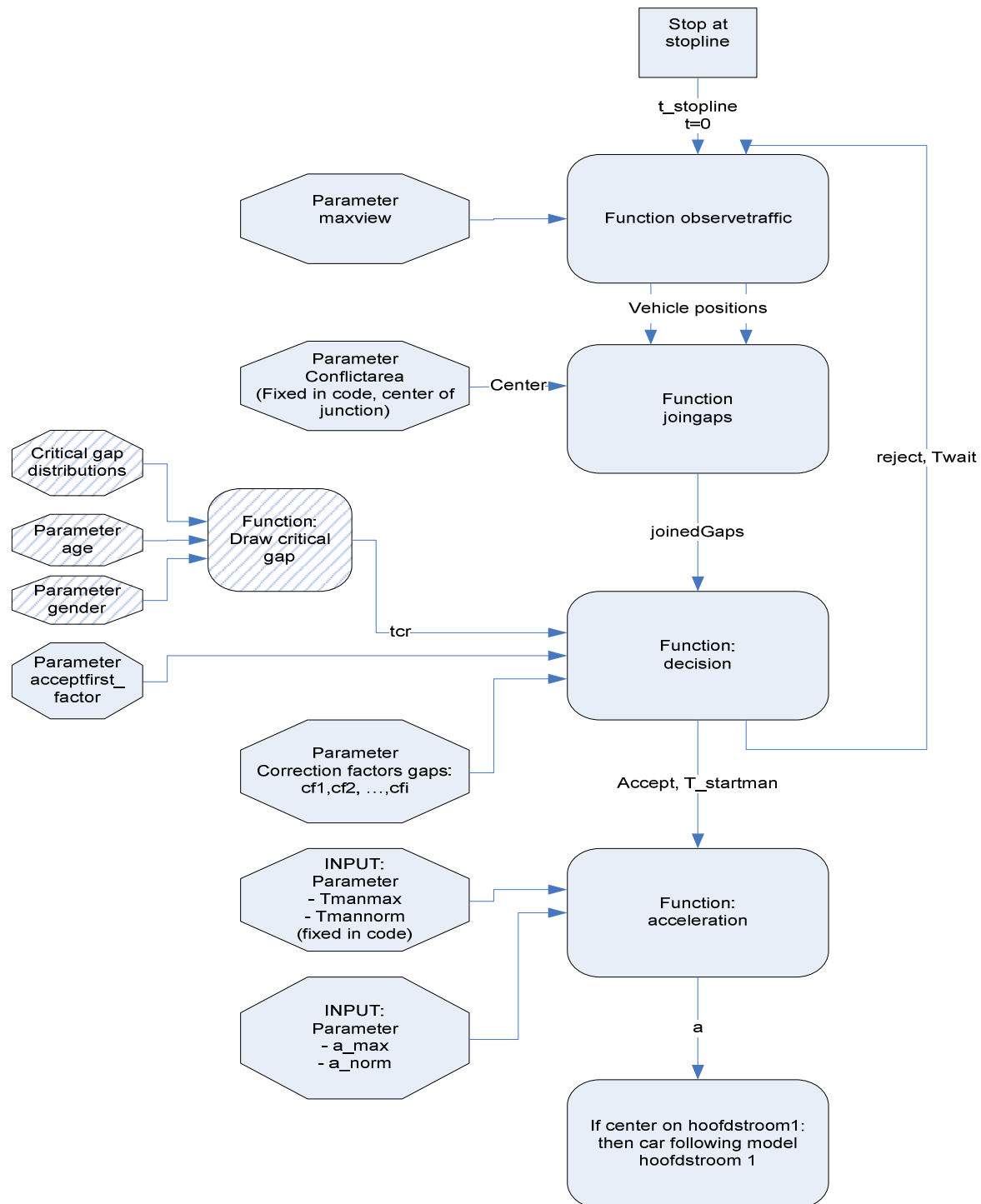
De afmetingen van de T-kruising is overgenomen van de kruising die in eerder onderzoek naar bestuurdersgedrag op een T-kruising is gebruikt (Abdoelbasier, 2006), zie figuur 5-5. De hoofdweg naar de kruising toe en van de kruising af zijn beiden 400 meter lang. Het zicht van de bestuurder wordt niet belemmerd. De nevenweg is 150 meter lang. De rijstrookbreedte is 3,5 meter. Het midden van het nevenstroomvoertuig wordt op 10 meter van het midden van de kruising geplaatst.



Figuur 5-5 Kruispuntconfiguratie gebaseerd op kruispunt uit Abdoelbasier (2006).

## 5.6 Statediagram

Het nieuwe hiaatacceptatiemodel en de aannames zoals beschreven in dit hoofdstuk zijn verwerkt in een diagram met functies en afhankelijkheden. Dit statediagram diende als basis voor de implementatie van het hiaatacceptatiemodel in MARS. Het statediagram in figuur 5-6 is de uiteindelijke versie zoals het model is geïmplementeerd, met uitzondering van de gearceerde gedeelten die via een invoerbestand worden gegenereerd. In Bijlage B zijn de functies uit dit statediagram weergegeven en beschreven.



Figuur 5-6 Statediagram van de implementatie

## 5.7 Invoer en uitvoer van het simulatiemodel

Het hiaatacceptatiemodel en het voertuigvolgmodel hebben invoergegevens nodig om te kunnen draaien. De invoerbestanden worden door het geïmplementeerde simulatiemodel ingelezen. De uitvoer van het simulatiemodel moet de afgeleide veiligheidsindicatoren en de wachttijd van de links afslaan bestuurder kunnen weergeven.

### 5.7.1 Invoer

De invoerbestanden worden voorafgaand aan een simulatie gemaakt in een Excelsheet met behulp van macro's. De parameters die niet vast zijn geprogrammeerd in de code, kunnen via de invoerbestanden aangepast en ingevoerd worden. Op deze manier ontstaat een grote flexibiliteit voor de gebruiker om met verschillende instellingen te simuleren. Er zijn zeven invoerbestanden, zie tabel 5-1. Drie bestanden voor voertuigen in de nevenstroom en twee bestanden voor voertuigen in elke hoofdstroom. Elke bestuurder in de nevenstroom heeft één regel in de nevenstroomtrack, advanced cruise control en gap acceptance model bestanden. De invoerbestanden zijn gekoppeld door middel van een unieke trackID. De hoofdstroombestuurders hebben een regel in het hoofdstroom track en advanced cruise control bestanden en zijn ook gekoppeld. De gedetailleerde structuur van de inputfiles en de bijbehorende instellingen zijn gegeven in Bijlage C.

Tabel 5-1 Invoerbestanden simulatiemodel

| Naam invoerbestand                             | Omschrijving                                                                                                                |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nevenstroom track                              | Startgegevens van elk voertuig in nevenstroom, waaronder starttijd, positie, richting.                                      |
| Nevenstroom advanced cruise control            | Parameters van voertuigvolgmodel van elk voertuig in nevenstroom.                                                           |
| Nevenstroom gap acceptance model               | Parameters van het hiaatacceptatiemodel, waaronder bestuurderskenmerken, kritiek hiaat, weegfactoren, maximale versnelling. |
| Hoofdstroom van rechts track                   | Startgegevens van elk voertuig in hoofdstroom van rechts, waaronder starttijd, positie, richting.                           |
| Hoofdstroom van rechts advanced cruise control | Parameters van voertuigvolgmodel van elk voertuig in hoofdstroom van rechts.                                                |
| Hoofdstroom van links track                    | Startgegevens van elk voertuig in hoofdstroom van links, waaronder starttijd, positie, richting.                            |
| Hoofdstroom van links advanced cruise control  | Parameters van voertuigvolgmodel van elk voertuig in hoofdstroom van links.                                                 |

### 5.7.2 Uitvoer

In de uitvoer van het model zijn de afgeleide veiligheidsindicatoren en de wachttijd van de manoeuvres opgeslagen. Gedurende de manoeuvre zijn tussenvariabelen vastgelegd voor testdoeleinden. De uitvoer bestaat uit één regel per beslissingsmoment van een bestuurder. In elke regel worden 24 parameters gelogd. Aan het eind van elke manoeuvre worden de afgeleide veiligheidsindicatoren, de maximale afremming van het hoofdstroomvoertuig en de wachttijd berekend en opgeslagen. De laatste regel van een manoeuvre bestaat uit 29 parameters. In Bijlage D wordt het

uitvoerbestand besproken. In Bijlage E staat een beschrijving van de berekening van de afgeleide veiligheidsindicatoren.

## **5.8 Conclusies**

Op basis van het conceptuele model uit hoofdstuk 4, de kruising en de afgeleide veiligheidsindicatoren is gewerkt aan de implementatie van het nieuwe hiaatacceptatiemodel in de simulatieomgeving MARS.

In het geïmplementeerde hiaatacceptatiemodel is het mogelijk bij elke bestuurder aan te geven in welke mate meerdere hiaten in de beslissing worden meegenomen. Daarnaast is het mogelijk om elke bestuurder een eigen kritiek hiaat mee te geven. Een verdeling van dit kritieke hiaat kan vooraf aan de simulaties worden opgegeven in de invoerbestanden.

De aannames over het rijdrag van de bestuurder en de hoofdstroombestuurders hebben er voor gezorgd dat het verkeer en rijgedrag voldoende functioneert om een vergelijking te kunnen maken. De starttijden van het verkeer op de hoofdstromen worden via invoerbestanden aan het model gegeven. Het verkeer op de hoofdstromen komt met variatie aan en reageert alleen op de invoegende bestuurder. De afgeleide veiligheidsindicatoren worden berekend tussen de bestuurder en de opkomende voertuigen in de hoofdstromen. De uitvoer van het model geeft de mogelijkheid om de experimenten met elkaar te kunnen vergelijken op wachttijd en afgeleide veiligheidsindicatoren.

De implementatie van het hiaatacceptatiemodel, het rijgedrag en de kruising heeft er toe geleid dat een simulatieomgeving beschikbaar is waarin verschillende verkeersstromen en manieren van beslissen kunnen worden onderzocht.

## Hoofdstuk 6      Simulaties

---

Het geïmplementeerde hiaatacceptatiemodel is gesimuleerd met verschillende instellingen. Het doel van de simulaties is aan te tonen of het nieuwe hiaatacceptatiemodel veranderingen geeft in afgeleide veiligheidsindicatoren en wachttijd als meerdere hiaten in de beslissing worden meegenomen.

In dit hoofdstuk worden de instellingen van de simulaties en de resultaten van de simulaties besproken. Het hoofdstuk besluit met een discussie over de gedane aannames en de conclusies over de veranderingen die het nieuwe hiaatacceptatiemodel geeft.

### **6.1    *Instellingen van de experimenten***

De uitkomsten van de testfase en proefexperimenten zijn gebruikt om de instellingen te bepalen voor de uiteindelijke experimenten. De simulaties draaien real-time en maakten keuzes noodzakelijk in de hoeveelheid kritieke hiaten, de hoeveelheid manieren van beslissen en de hoeveelheid verkeersstromen die gesimuleerd zijn.

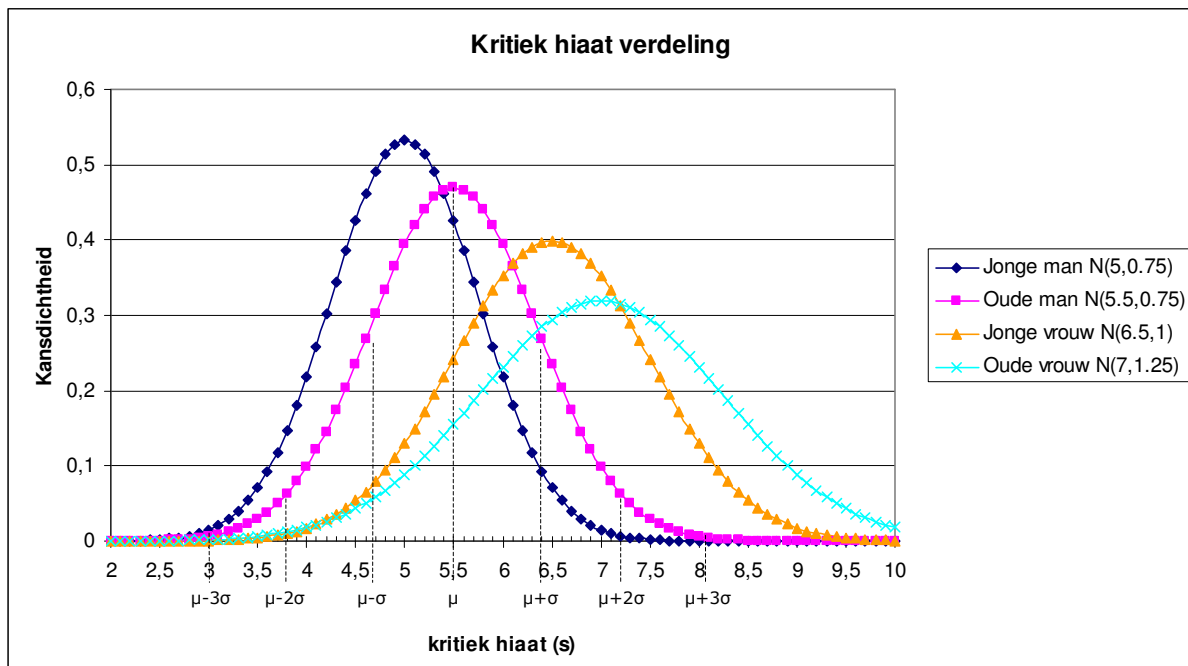
#### 6.1.1    Instellingen van het hiaatacceptatiemodel

##### **Kritieke hiaten**

Een keuze voor welke kritieke hiaten gesimuleerd zijn in de experimenten is nodig. Het is mogelijk om een kansverdeling voor het kritieke hiaat te hanteren in de invoerbestanden. Uit proefruns is gebleken dat een gelijk kritiek hiaat bij een gelijke verkeersstroom en manier van beslissen resulteert in dezelfde uitkomsten. Dit strookt met de opzet van het model. Het heeft dus geen zin om dezelfde kritieke hiaten te simuleren. Met een kansverdeling is de kans erg groot dat dezelfde kritieke hiaten worden getrokken en gesimuleerd.

Gezien het doel van de simulaties, aantonen of veranderingen optreden, en de beperking ten aanzien van het aantal simulaties zijn zeven kritieke hiaten gekozen. De lange en korte kritieke hiaten zijn gekozen om zowel verschil in conflicten te kunnen waarnemen als verschil in wachttijden.

De keuze van de zeven kritieke hiaten is gebaseerd op de kritieke hiaat verdelingen die eerder zijn gebruikt door Sayed *et al.* (1994), zie figuur 6-1. Het zijn vier normaal-verdelingen met onderscheid in leeftijd en geslacht. In de legenda figuur 6-1 staan tussen haakjes het gemiddelde en de standaard deviatie van de normaal verdeling. Door te kiezen voor gelijke afstanden, (steeds 1 standaard deviatie) en de extremen van de kritieke hiaat verdeling van de oude man uit figuur 6-1, wordt een voldoende grote spreiding van de kritieke hiaten verkregen. Een groot gedeelte van de overige verdelingen wordt met de keuze van deze zeven kritieke hiaten gedekt. De gekozen kritieke hiaten zijn weergegeven in figuur 6-1 en tabel 6-1.



Figuur 6-1 Kritiek hiaat verdelingen STOP-kruising (Sayed et al., 1994)

Tabel 6-1 Gesimuleerde kritieke hiaten

| Ligging in verdeling N(5.5,0.75) | Kritiek hiaat(s) |
|----------------------------------|------------------|
| $\mu-3\sigma$                    | 3                |
| $\mu-2\sigma$                    | 3,8              |
| $\mu-1\sigma$                    | 4,7              |
| $\mu$                            | 5,5              |
| $\mu+1\sigma$                    | 6,4              |
| $\mu+2\sigma$                    | 7,2              |
| $\mu+3\sigma$                    | 8,1              |

### Instellingen meerdere hiaten in de beslissing

Vier experimenten zijn uitgevoerd waarin de instellingen van het hiaatacceptatiemodel zijn gevarieerd. De instellingen van de weegfactoren per experiment staan in tabel 6-2.

Tabel 6-2 Experimenten en de bijhorende weegfactoren

| Experimentnaam     | Weegfactor hiaat 1 | Weegfactor hiaat 2 | Weegfactor hiaat 3 | Weegfactor hiaat 4 |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Experiment 1       | 1                  | 0                  | 0                  | 0                  |
| Experiment 2       | 1                  | 0,75               | 0                  | 0                  |
| Experiment 4-(0,5) | 1                  | 0,5                | 0,25               | 0,125              |
| Experiment 4       | 1                  | 0,75               | 0,5                | 0,25               |

Experiment 1 is het bestaande hiaatacceptatiemodel waarin alleen het eerste hiaat wordt meegenomen in de beslissing. In de overige drie experimenten zijn verschillende instellingen gerealiseerd voor de mate waarin meerdere hiaten in de beslissing worden meegenomen. In experiment 2 wordt naast het eerste hiaat ook het tweede hiaat geëvalueerd. De laatste twee experimenten nemen beide 4 hiaten mee in de beslissing, alleen het gewicht verschilt waarin de



bestuurders de volgende hiaten meewegen. In experiment 4-(0,5) wordt elk volgend hiaat de helft minder gewaardeerd. In experiment 4 lopen de vier weegfactoren lineair af met 0,25. De mogelijkheid om de vijfde weegfactor in te vullen is niet toegepast, omdat in deze opzet een verschil in resultaten tussen experiment 4-(0,5) en 4 toegeschreven kan worden aan het gewicht van de weegfactoren. Daarnaast zijn in experiment 2 en 4 de eerste twee hiaten gelijk aan elkaar, waardoor hier ook een vergelijking kan worden gemaakt. Het verschil tussen deze twee experimenten kan worden gezien als een gevoeligheid van het model voor het aantal hiaten dat wordt meegenomen in de beslissing.

### 6.1.2 Instellingen van de verkeersstroom

In onderzoek naar conflicten op een T-kruising binnen de bebouwde kom in Zweden lag de intensiteit in één richting tijdens de ochtendspits rond de 600 vtg/uur (Archer, 2005). Voor de hoofdstroom van links is gekozen voor een intensiteit van 500 vtg/uur. Dit is gedaan vanwege de beperking van 26 voertuigen die tegelijk aanwezig kunnen zijn in de simulatie. Uit proefexperimenten is gebleken dat een intensiteit van 600 vtg/uur van de hoofdstroom van rechts en 500 vtg/uur van de hoofdstroom van links een werkbaar aantal conflicten oplevert tussen het nevenstroomvoertuig en de twee hoofdstromen. Daarnaast kunnen ook de bestuurders met een lang kritiek hiaat in bijna alle verkeersstromen een geschikt hiaat vinden.

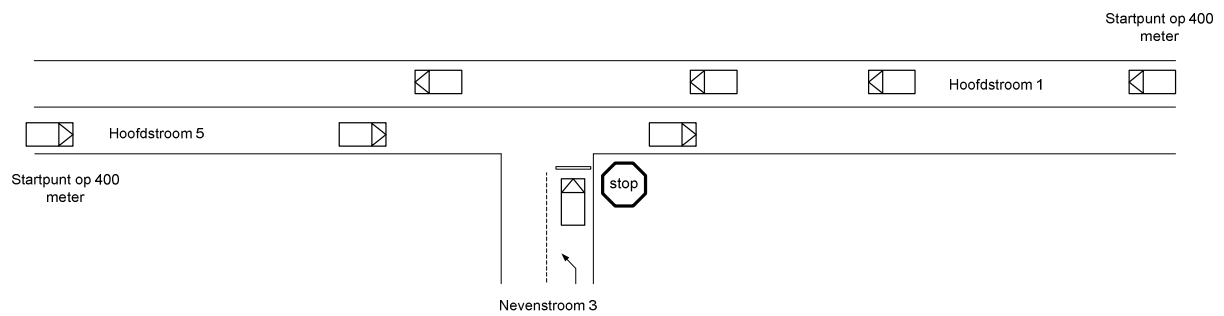
Het aantal verschillende verkeersstromen in de experimenten is bepaald op vijftig. Met vijftig verkeersstromen gebaseerd op trekkingen uit de voertuigvolgtijdverdeling wordt voor variatie gezorgd tussen de verkeersstromen waarin de bestuurder moet invoegen.

Het voertuigvolgmodel is ingesteld zodat minimale volgtijden van 1 seconde kunnen worden gehanteerd. Op deze manier kunnen alle voertuigvolgtijden uit de kansverdeling daadwerkelijk gerealiseerd worden in de simulaties. Daarbij zijn er geen fluctuaties in snelheid van de hoofdstroomvoertuigen aanwezig. De hoofdstroombestuurders remmen alleen in reactie op het links afslaande nevenstroomvoertuig.

### 6.1.3 Opzet van een experiment

De zeven kritieke hiaten en de vier instellingen van het beslismodel moeten vergeleken worden in dezelfde verkeersstromen. Een experiment bestaat uit runs waarin de verschillende bestuurders en verkeersstromen worden gesimuleerd.

In elke run wordt één bestuurder gesimuleerd die in één verkeersstroom een geschikt hiaat moet kiezen. De bestuurder wordt op tijdstip nul van een run geplaatst op de kruising. De hoofdstroomvoertuigen zijn dan geplaatst op de hoofdweg volgens de voertuigvolgtijdverdeling, zie figuur 6-2. Er worden twee minuten lang voertuigen gegenereerd vanaf het startpunt van de hoofdstromen.



Figuur 6-2 Startsituatie van een run (posities van voertuigen afhankelijk van verkeersstroom)

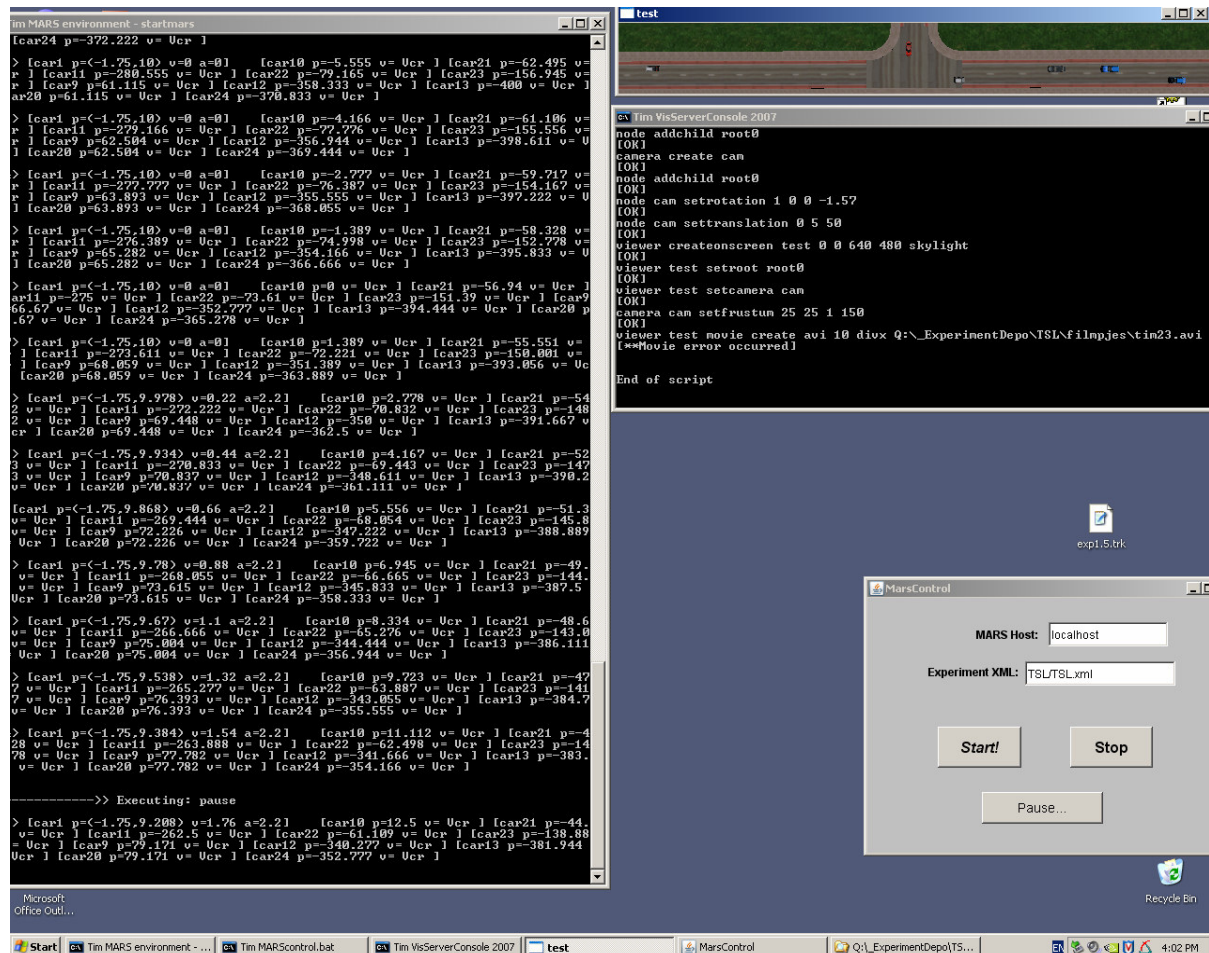
Na tweeënhalve minuut kan de bestuurder altijd invoegen omdat dan al het verkeer de kruising voorbij is gereden. Een run eindigt na drie minuten. Na deze drie minuten start een nieuwe run. De verkeersstroom in de nieuwe run wordt op deze manier niet beïnvloedt door de gedragingen van de voertuigen van de vorige run.

Per experiment rijden zeven bestuurders in de vijftig verkeersstromen, zie figuur 6-2. Elk experiment bestaat uit 350 runs, zie tabel 6-3. Daarin zijn de verkeersstromen en de kritieke hiaten van de bestuurders tussen de experimenten constant gehouden. Het verschil tussen de experimenten bestaat alleen nog uit de vier verschillende instellingen van het beslismodel. Nu is een vergelijking mogelijk tussen experimenten, maar ook tussen de kritieke hiaten van de bestuurders.

Tabel 6-3 Experiment schema

| Verkeersstroom \ Bestuurder (kritiek hiaat) | 1 | 2 | 3 | 4 | ... | 50 |
|---------------------------------------------|---|---|---|---|-----|----|
| 1 (3 seconde)                               |   |   |   |   |     |    |
| 2 (3,8 seconde)                             |   |   |   |   |     |    |
| 3 (4,7 seconde)                             |   |   |   |   |     |    |
| 4 (5,5 seconde)                             |   |   |   |   |     |    |
| 5 (6,4 seconde)                             |   |   |   |   |     |    |
| 6 (7,2 seconde)                             |   |   |   |   |     |    |
| 7 (8,1 seconde)                             |   |   |   |   |     |    |

Figuur 6-3 is een screenshot van het simulatiemodel tijdens een experiment. De visualisatie van de T-kruising is rechtsboven weergegeven. De posities en snelheden van de voertuigen op elke tijdstap beslaat de linkerhelft van het scherm. De uitvoer van het model wordt in een tekstbestand weggeschreven en is niet te zien in figuur 6-3.



Figuur 6-3 Het simulatiemodel tijdens een experiment

## 6.2 Resultaten van de simulaties

De simulaties van de vier experimenten is achter elkaar uitgevoerd op een PC met Intel Core 2 6600 2,4 GHz processor en 1 GB intern geheugen. Elk experiment heeft een simulatieduur van 17,5 uur.

In drie van de vijftig verkeersstromen heeft elke bestuurder in elk experiment dezelfde tijd moeten wachten en hetzelfde hiaat geaccepteerd. Een uitsplitsing naar bestuurder, en daarmee in kritiek hiaat, geeft een gedetailleerder beeld. In tabel 6-4 is een overzicht gegeven van het aantal runs waarin de wachttijd gelijk is gebleven in de vier experimenten. Bij een kritiek hiaat van 3 seconden is in 25 runs de wachttijd gelijk en daarmee ook de afgeleide veiligheidsindicatoren. Bij de twee langste kritieke hiaten is dit in 30 van de 50 verkeersstromen het geval. Hoe langer het kritieke hiaat, hoe minder invloed het meewegen van meerdere hiaten heeft.

*Tabel 6-4 Aantal runs waarin de wachttijd gelijk is gebleven bij alle experimenten per kritiek hiaat*

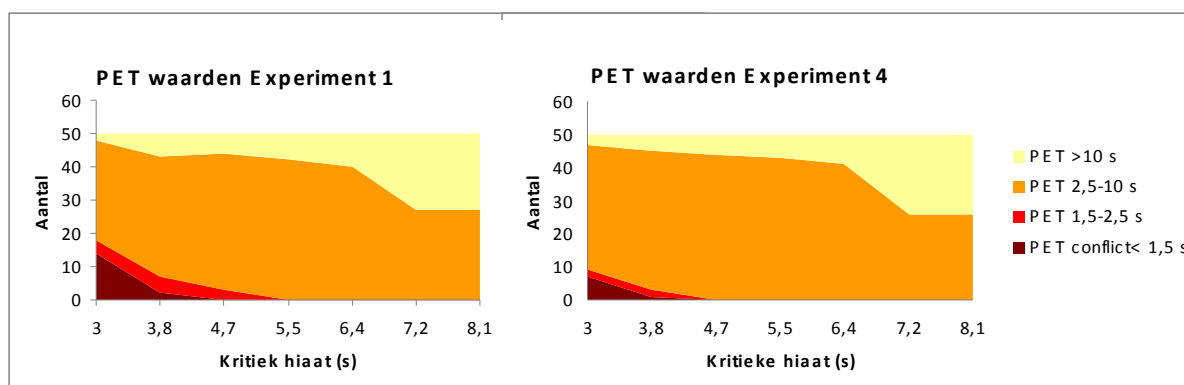
| Kritiek hiaat (s) | Aantal runs waarin wachttijd gelijk is gebleven |
|-------------------|-------------------------------------------------|
| 3,0               | 25                                              |
| 3,8               | 25                                              |
| 4,7               | 29                                              |
| 5,5               | 29                                              |
| 6,4               | 27                                              |
| 7,2               | 30                                              |
| 8,1               | 30                                              |

### 6.2.1 Afgeleide veiligheidsindicatoren

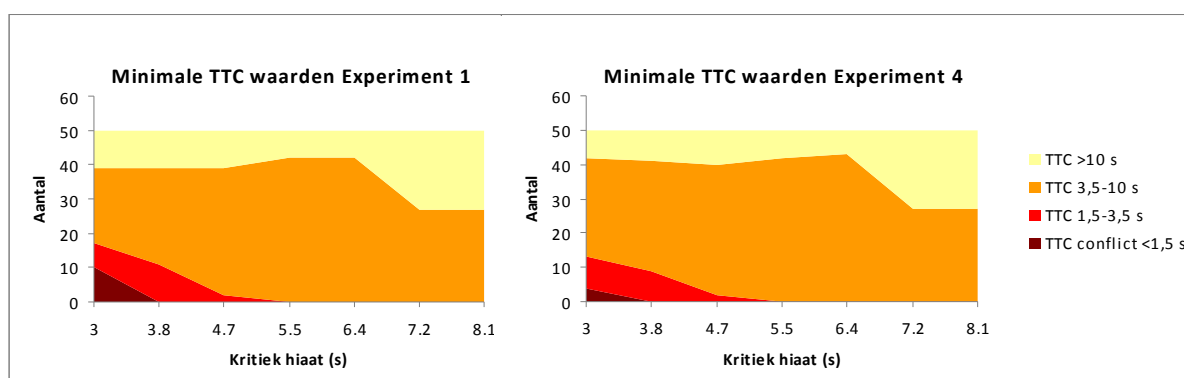
Van experiment 1 en 4 is een beeld gemaakt van de verandering in de grootte van de afgeleide veiligheidsindicatoren, zie figuur 6-4 en figuur 6-5. De instellingen van deze twee experimenten, één hiaat en vier hiaten, liggen het meest uiteen. Er zijn per indicator drie klassen gemaakt en de aantallen per klasse zijn weergegeven.

Binnen beide experimenten is een verschuiving van de PET-waarden naar de grotere klassen. Hoe langer het kritieke hiaat, hoe groter de indicatorwaarden worden. Het aantal conflicten neemt af naarmate het kritieke hiaat langer wordt. Bij de twee langste kritieke hiaten treden geen verschuivingen op. Bij de minimale TTC-waarden is een zelfde beeld te zien, behalve dat bij een kritiek hiaat van 5,5 seconden een lichte stijging is in de middelste indicatorklasse.

Het aantal PET- en TTC-conflicten daalt tussen experiment 1 en 4. Door meerdere hiaten in de beslissing mee te nemen vallen de indicatorwaarden voor zowel de minimale TTC als de PET groter uit.



Figuur 6-4 PET-waarden experiment 1 en 4



Figuur 6-5 Minimale TTC-waarden experiment 1 en 4

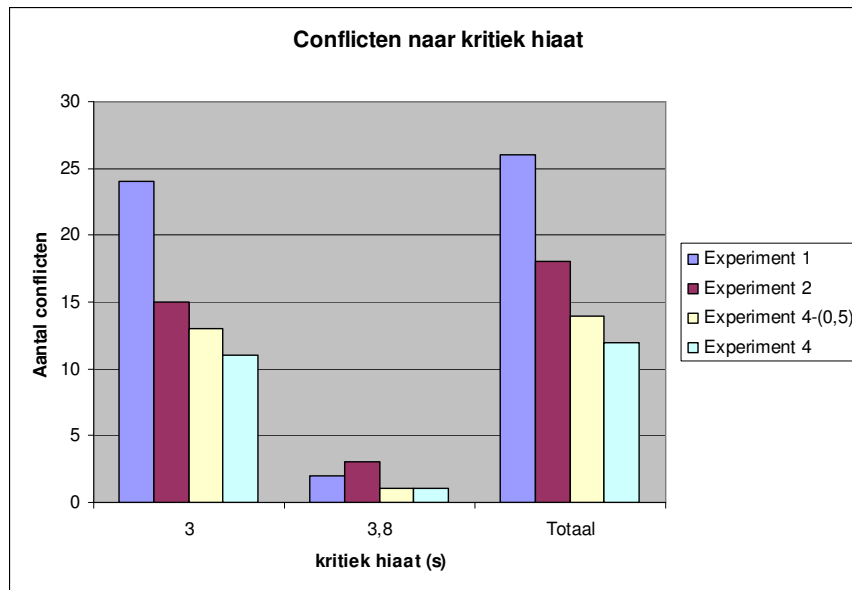
## 6.2.2 Aantal conflicten

Aan de hand van de afgeleide veiligheidsindicatoren TTC en PET kan het aantal conflicten tussen het links afslaande nevenstroomvoertuig en de voertuigen op de hoofdweg worden bepaald. Het totaal aantal conflicten per experiment is weergegeven in tabel 6-5.

Tabel 6-5 Totaal aantal conflicten

| Experimentnaam     | Weegfactoren     | PET | TTC | Totaal |
|--------------------|------------------|-----|-----|--------|
| Experiment 1       | 1,0,0,0          | 16  | 10  | 26     |
| Experiment 2       | 1,0.75,0,0       | 13  | 5   | 18     |
| Experiment 4-(0,5) | 1,0.5,0.25,0.125 | 10  | 4   | 14     |
| Experiment 4       | 1,0.75,0.5,0.25  | 8   | 4   | 12     |

Het meenemen van twee hiaten in de beslissing (experiment 2) resulteert in een daling van het aantal conflicten. Vier hiaten in de beslissing (experiment 4-(0,5)) geeft een verdere daling, vooral in de PET-conflicten. Een zwaardere weging van de vier hiaten (verschil tussen experiment 4-(0,5) en 4) geeft nog een kleine daling van het aantal conflicten. In figuur 6-6 zijn de conflicten uitgesplitst naar kritiek hiaat. De conflicten doen zich alleen voor bij kritieke hiaten van 3 en 3,8 seconden.



Figuur 6-6 Totaal aantal conflicten uitgesplitst naar kritiek hiaat

### 6.2.3 Wachtijd

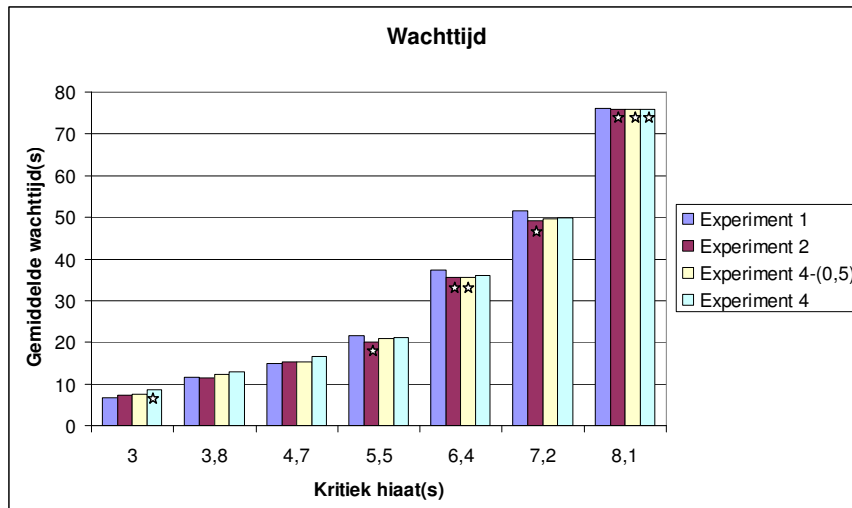
De wachttijden zijn gemiddeld over de vijftig runs en de kritieke hiaten. De resultaten staan in tabel 6-6. De gemiddelde wachttijd van de vier experimenten verschillen nauwelijks. Met behulp van de parametervrije Wilcoxon-signed-rank toets is nagegaan in hoeverre de verschillen significant zijn. Er is tweezijdig getoetst met een onbetrouwbaarheidsdrempel van  $\alpha = 0,05$ . De uitwerking is gegeven in de Bijlage F.

Tabel 6-6 Gemiddelde wachttijd per nevenstroombestuurder per experiment

| Experimentnaam     | Weegfactoren     | Gemiddelde wachttijd(s) | Verskil tov experiment 1 statistisch significant? |
|--------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| Experiment 1       | 1,0,0,0          | 31,4                    | nvt                                               |
| Experiment 2       | 1,0.75,0,0       | 30,7                    | Ja                                                |
| Experiment 4-(0,5) | 1,0.5,0.25,0.125 | 31,0                    | Ja                                                |
| Experiment 4       | 1,0.75,0.5,0.25  | 31,6                    | Nee                                               |

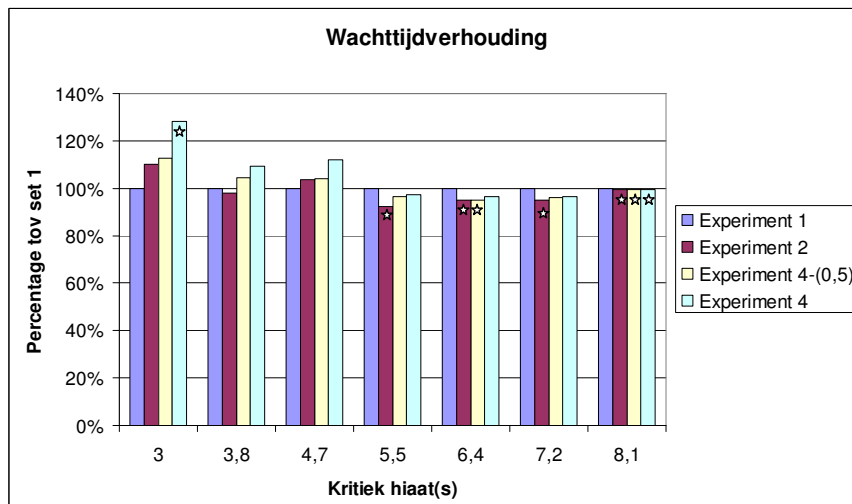
De gemiddelde wachttijden zijn opgesplitst naar kritiek hiaat in figuur 6-7. De gemiddelde wachttijd loopt op naarmate het kritieke hiaat langer wordt.

De wachttijden per kritiek hiaat zijn statistisch getoetst met de Wilcoxon-Signed-rank toets. Een significant verschil ten opzichte van experiment 1 is in figuur 6-7 en figuur 6-8 met een sterretje aangegeven. De verschillen zijn tweezijdig getoetst met een onbetrouwbaarheidsdrempel van  $\alpha = 0,05$ . In Bijlage F is de toetsingsprocedure uitgewerkt.



Figuur 6-7 Wachttijden naar kritiek hiaat en experiment

De gemiddelde wachttijden van experiment 2, 4-(0,5) en 4 zijn genormeerd naar de gemiddelde wachttijd van experiment 1 in figuur 6-8. De verschillen tussen de experimenten zijn nu beter te zien.



Figuur 6-8 Wachttijdverhouding per kritiek hiaat ten opzicht van experiment 1

De resultaten geven geen eenduidig beeld. Alleen de wachttijd van kritiek hiaat 3 seconden in experiment 4, waarbij de meerdere hiaten het zwaarst worden meegenomen, is significant langer dan de wachttijd van experiment 1. De gemiddelde wachttijd stijgt in dit geval van 6,7 naar 8,6 seconden.

De wachttijden in experiment 2, met twee hiaten in de beslissing, zijn bij de langere kritieke hiaten korter dan de wachttijden in experiment 1. Bij een kritiek hiaat van 5,5 seconden daalt de gemiddelde wachttijd significant van 21,6 naar 20,0 seconden. Het verschil in wachttijden van kritiek hiaat 8,1 seconden is miniem, maar wel statistisch significant volgens de toets. De wachttijden van kritiek hiaat 8,1 seconden lijken niet geschikt om getoetst te worden met de Wilcoxon-Signed-rank toets. Een andere toets kon niet toegepast worden, zie Bijlage F voor een beschrijving.

## **Twee effecten in de wachttijd**

Een nadere blik op de onderliggende data wijst op twee tegengestelde effecten. In de figuur 6-7 en figuur 6-8 is de combinatie van deze twee effecten te zien.

Het eerste effect is dat de wachttijd langer wordt doordat meerdere hiaten worden meegenomen in de keuze. Dit effect doet zich vooral voor bij korte kritieke hiaten. Dit heeft met de indeling van de verkeersstroom te maken. De kans dat in de verkeersstroom een langer hiaat voorkomt, is bij een kort kritiek hiaat groter dan bij een lang kritiek hiaat. Daardoor stijgt de wachttijd bij korte kritieke hiaten meer dan bij lange kritieke hiaten.

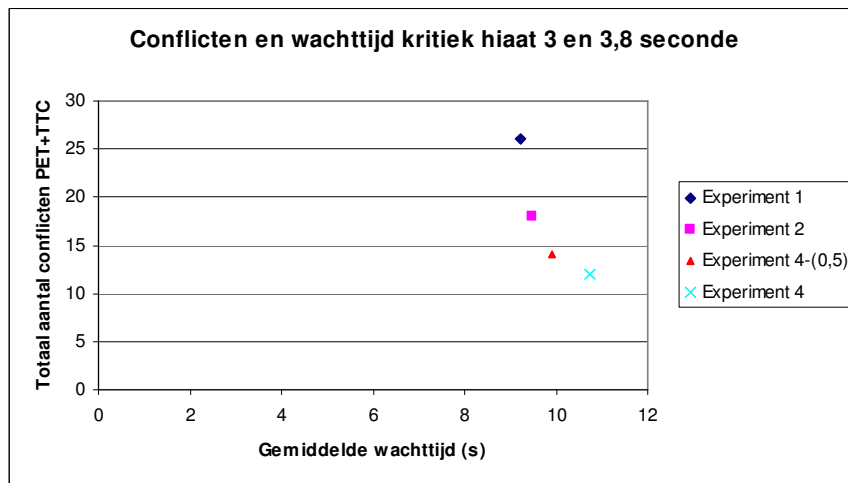
Het tweede effect is tegengesteld aan het eerste. De wachttijd wordt namelijk ook korter als meerdere hiaten worden meegenomen in de beslissing. In experiment 2, 4-(0,5) en 4 is dat het geval. Doordat de bestuurder meerdere hiaten meeneemt in de beslissing, anticipeert de bestuurder beter op de verkeersstroom dan de evaluatie van alleen het eerste hiaat. Met meerdere hiaten in de beslissing kunnen nu hiaten worden geaccepteerd die bij experiment 1 werden geweigerd. In de uitvoer van de simulaties is dit effect gezien. Het effect is te verklaren doordat één keer per seconde een beslissing wordt genomen. De beslissing in experiment 1 kan net in het hiaat vallen en daardoor kan het hiaat net te kort zijn om te accepteren. In de andere experimenten wordt dit hiaat wél meegenomen en wordt een beslissing vlak voor het begin van het hiaat genomen.

Het tweede effect, dat hiaten in experiment 2, 4-(0,5) en 4 eerder worden geaccepteerd, doet zich voor bij alle kritieke hiaten. Bij de langere kritieke hiaten resulteert dit in kortere gemiddelde wachttijden door het bijna ontbreken van het eerste effect. De combinatie van de twee beschreven effecten kan de uitkomsten gepresenteerd in figuur 6-8 verklaren.

### **6.2.4 Relatie tussen conflicten en wachttijd**

Een interessant gegeven is de relatie tussen de wachttijd en het aantal conflicten per experiment. Omdat de gemiddelde wachttijd per experiment nauwelijks verschilt, is de gemiddelde wachttijd van de twee kritieke hiaten, waarbij conflicten voorkomen, vergeleken. In figuur 6-9 is de gemiddelde wachttijd uitgezet tegen het aantal conflicten van kritieke hiaten 3 en 3,8 seconden.





Figuur 6-9 Aantal conflicten uitgezet naar gesommeerde gemiddelde wachttijd van kritiek hiaat 3 en 3,8 seconden

Figuur 6-9 laat zien dat het aantal conflicten en de gemiddelde wachttijd langer wordt als meer hiaten in de beslissing worden meegenomen.

### 6.3 Discussie van de resultaten

Het nieuwe hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing van de bestuurder is geïmplementeerd en gesimuleerd. Bij de ontwikkeling en de implementatie van het model is een groot aantal aannames gedaan. De simulaties en de implementatie van het model hebben als doel gehad de instellingen van het hiaatacceptatiemodel te evalueren. In deze paragraaf wordt de invloed van de aannames op de resultaten besproken. Daarnaast wordt ingegaan op een aantal verbeteringen die aan het model gedaan kunnen worden.

#### 6.3.1 Hiaatacceptatiemodel

De verdeling van het kritieke hiaat zorgt voor variatie tussen de bestuurders. In de experimenten is een uniforme verdeling aangehouden. De extreme kritieke hiaten van 3 en 8,1 seconden zullen in de praktijk minder vaak voorkomen dan het middelste kritieke hiaat van 5,5 seconden. Het gebruik van verschillende kansverdelingen per bestuurdersgroep zal leiden tot meer variatie tussen de bestuurders, waardoor het mogelijk is om het hiaatacceptatiemodel realistischer te maken.

De wegingsfactoren van het nieuwe hiaatacceptatiemodel zijn nu gebaseerd op de posities van de hiaten in de verkeersstroom. Bij een aantal korte hiaten in de verkeersstroom evalueert een bestuurder over een kleine afstand en bij een aantal lange hiaten over een grote afstand. Een andere mogelijkheid is de weegfactoren baseren op de afstand van het begin van elk hiaat tot de kruising. Een moeilijkheid is dan wel dat indirect in de afstand van een hiaat tot de kruising ook de grote van de hiaten er voor is meegenomen.

### 6.3.2 Rijgedrag van de bestuurder

Naast het hiaatacceptatiemodel zijn voor de links afslaande bestuurder aannames gedaan over de overige onderdelen van het rijgedrag op de T-kruising.

In dit overige rijgedrag is geen onderscheid gemaakt tussen bestuurders. Dit komt niet ten goede aan de realiteit van het bestuurdersgedrag op de kruising en de berekening van de afgeleide veiligheidsindicatoren. De uitdaging ligt er om ook de variatie in bestuurders op de overige onderdelen van het rijgedrag mee te nemen en vooral de interactie tussen de verschillende sub-gedragsmodellen.

### 6.3.3 Rijgedrag van de hoofdstroombestuurders

Het geïmplementeerde en aangepaste voertuigvolgmodel voor de voertuigen op de hoofdstromen zorgt voor een redelijk natuurlijk remgedrag in reactie op de links afslaande bestuurder.

De instellingen van het voertuigvolgmodel zijn voor elke hoofdstroombestuurder gelijk en de instellingen hebben er voor gezorgd dat de snelheid en volgtijden van de voertuigen constant blijven. Het is mogelijk om variatie in snelheid en reacties van de bestuurders in het voertuigvolgmodel aan te brengen zodat een meer natuurlijk beeld van de verkeerssituatie kan worden gecreëerd.

Een grote beperking van het voertuigvolgmodel is dat het model pas reageert op het moment dat het midden van het links afslaande voertuig op de rijbaan van de hoofdstroombestuurder is. Deze beperking in het voertuigvolgmodel is alleen op te lossen door een nieuw voertuigvolgmodel voor het naderen van kruisingen te ontwikkelen. In dit nieuwe model moet de hoofdstroombestuurder meer om zich heen kijken en voorspellingen doen hoe andere bestuurders manoeuvreren en reageren. Een uitwerking kan zijn dat het remmen van een hoofdstroombestuurder afhankelijk is van de voorspelde tijd tussen de twee kruisende voertuigen. Maar deze uitwerking van de beslisregel ligt heel erg dicht tegen de definitie van de PET aan. Door een dergelijke beslisregel wordt de afgeleide veiligheidsindicator in wezen geprogrammeerd. Met behulp van perceptie en fouten van de hoofdstroombestuurder zouden deze beslisregels wel gebruikt kunnen worden.

### **Verkeersstroom**

De vorm en intensiteit van de verkeersstroom bepaalt de uitkomsten van de experimenten. Andere instellingen van de verkeersstroom dan in de experimenten gesimuleerd, kunnen leiden tot andere resultaten.

Met de huidige intensiteit van de verkeersstromen heeft het meewegen van meerdere hiaten voor de lange kritieke hiaten niet veel effect, omdat er maar weinig lange hiaten in de verkeersstroom aanwezig zijn. Bij een lagere intensiteit zijn meer lange hiaten in de stroom, waardoor de wachttijd waarschijnlijk zal dalen en er meer verschil in wachttijd zal optreden tussen de manieren van beslissen. Bij een lagere intensiteit zullen waarschijnlijk minder conflicten optreden.

Een gecombineerde voertuigvolgtijdverdeling in plaats van de Erlang-2 verdeling kan er voor zorgen dat de hoofdstroomvoertuigen meer gegroepeerd aankomen. Zijn er veel geclusterde voertuigen dan heeft het nieuwe hiaatacceptatiemodel alleen effect als er veel hiaten worden meegewogen.

### 6.3.4 Afgeleide veiligheidsindicatoren

De verkeersveiligheidseffecten stroomopwaarts zijn in deze evaluatie niet meegenomen. Kopstaartconflicten vormen een groot gedeelte van de ongevallen rond kruisingen en in de toekomst moeten deze conflicten ook meegenomen moeten worden.

#### Conflicten

In alle experimenten ontstaan meer PET-conflicten dan TTC-conflicten. De verwachting was dat meer TTC-conflicten zouden ontstaan omdat de bestuurder meer tijd nodig heeft om de rijstrook te bereiken waarin wordt ingevoegd. Dit blijkt dat dit niet het geval.

Het verschil tussen het aantal PET- en TTC-conflicten kan met het aangepaste voertuigvolgmodel voor het verkeer in de hoofdstroom van links te maken hebben. Het nevenstroomvoertuig wordt pas opgemerkt door de hoofdstroombestuurder als het midden van het nevenstroomvoertuig op de rijbaan is. Hiervan is ook sprake bij het voertuigvolgmodel van het verkeer in de hoofdstroom van rechts.

Aangezien het voertuigvolgmodel is ontwikkeld voor voertuigen die dezelfde richting oprijden, is meer geschikt voor het verkeer in de hoofdstroom van rechts.

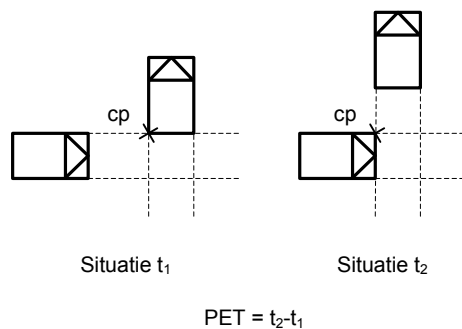
Een andere mogelijke verklaring is de drempelwaarde voor een conflict bij de TTC. In andere studies waarin de TTC als afgeleide veiligheidsindicator wordt gebruikt is een drempelwaarde van tussen de 3 en 4 seconden aangehouden (Minderhoud en Bovy, 2001; Archer, 2005). Met een drempelwaarde van 3,5 seconde is het aantal TTC-conflicten groter dan PET-conflicten, zie ook figuur 6-5 voor de ontwikkeling van de TTC-waarden.

Een derde verklaringsgrond zou de aanname van een constante acceleratie gedurende de gehele manoeuvre kunnen zijn. Een constante acceleratie zorgt er voor dat de acceleratie aan het begin van de manoeuvre wordt onderschat en aan het eind wordt overschat. Daardoor is de kans op PET-conflicten groter, dan TTC-conflicten.

#### Berekening van de PET-waarden

In de berekening van de PET zijn drie zaken op te merken.

1. Er wordt een schatting gemaakt van de PET op het moment dat het eerste voertuig het conflictpunt verlaat, situatie  $t_1$  in figuur 3-1. In deze schatting wordt de afstand tot het midden van het aankomende voertuig gedeeld door de huidige snelheid van het aankomende voertuig.
2. Door het midden van het aankomende voertuig te nemen in plaats van de voorbumper is in de schatting een fout van 2,25 meter gemaakt.
3. In de schatting van de PET is de absolute waarde genomen. Er zijn in de resultaten geen negatieve PET-waarden, terwijl in de visualisatie van enkele simulatie de voertuigen door elkaar rijden.



*Figuur 6-10 Post-encroachment-time (Van der Horst, 1990)*

De drie bovenstaande zaken hebben de volgende invloed op de PET-waarden.

1. De schatting van de PET in plaats van de daadwerkelijke verstreken tijd tussen de voertuigen heeft een verschillend effect op de grote van de PET-waarde. Dit heeft te maken met de snelheid en de mate van afremming van het opkomende voertuig.
  - Bij een grote PET reageert een opkomend voertuig niet op het links afslaande voertuig en zal de PET-waarde niet veranderen.
  - Vanaf het moment dat het links afslaande voertuig uit de baan is van het hoofdstroomvoertuig zal de hoofdstroombestuurder gaan accelereren. Dus vanaf het moment dat de schatting van de PET wordt gemaakt zal de snelheid van het hoofdstroomvoertuig toenemen. Dit betekent dat door de schatting een te grote PET wordt bepaald. De grootte van deze overschatting kan niet worden gegeven.
2. Bij een snelheid van  $13,89 \text{ ms}^{-1}$  betekent de fout van 2,25 meter een overschatting van de PET-waarden in de resultaten van 0,16 seconden. Bij een korte PET-waarde ligt de snelheid lager en dat leidt tot een grotere afwijking in de PET. De lagere snelheid ontstaat door een grote noodzakelijke remreactie. Bij een gehalveerde snelheid verdubbelt de overschatting van de PET.
3. In de resultaten staan enkele positieve PET-waarden die eigenlijk negatief zouden moeten zijn, omdat de voertuigen door elkaar rijden. Uit een onderzoek van de simulatieuitvoer en bijbehorende visualisaties blijkt dat bij een PET geaccepteerd hiaat van kleiner dan 3,4 seconde voertuigen niet door elkaar rijden, zie tabel 6-7. De situaties zijn als conflict gemarkeerd in de resultaten en hebben dus geen invloed op de uitkomsten.

*Tabel 6-7 Verkeersstromen, kritiek hiaat en PET-waarden*

| Verkeersstroom | Kritiek hiaat (s) | Geaccepteerd hiaat (s) | PET (s) | Door elkaar in visualisatie |
|----------------|-------------------|------------------------|---------|-----------------------------|
| 11             | 3                 | 3,11                   | 0,41    | Ja                          |
| 30             | 3                 | 3,01                   | 0,55    | Ja                          |
| 33             | 3                 | 3,21                   | 0,24    | Ja                          |
| 32             | 3                 | 3,41                   | 0,11    | Nee                         |

De drie zaken zijn aangepast in een nieuwe versie van het model. In vervolgonderzoek moet deze nieuwe code worden getest en gevalideerd.

### Negatieve minimale TTC-waarden

In één van de vijftig verkeersstromen en bij een bestuurder met kritiek hiaat van 3 seconde ontstaat in experiment 1 en experiment 2 bij de invoegmanoeuvre een negatieve minimale TTC. Dit betekent dat het achteropkomende hoofdstroomvoertuig in het links afslaande voertuig rijdt. Dit is in de visualisatie te zien.

In dit geval is het geaccepteerde hiaat 3,06 seconde groot en dus net groter dan het kritieke hiaat. De hoofdstroombestuurder gaat vol in de remmen voor de links afslaande bestuurder. In de experimenten met vier hiaten in de beslissing komen geen negatieve minimale TTC-waarden voor. Een aantrekkelijker hiaat is dan aanwezig en wordt gekozen.

Mogelijke oorzaken voor de negatieve minimale TTC-waarden zijn:

- Een geaccepteerd hiaat van 3,1 seconde lijkt een minimale grootte voor het geaccepteerde hiaat op deze kruising voor het invoegen. Doordat de kritieke hiaten niet zijn geschat op basis van data uit de werkelijkheid maar uit de literatuur zijn gehaald kan het zo zijn dat een te kort kritiek hiaat voor deze kruising en rijgedragmodellen is aangehouden.
- De start van de manoeuvre is niet afhankelijk van de grootte van het geaccepteerde hiaat. Waarschijnlijk is dat bij een kort geaccepteerd hiaat de bestuurder eerder zal starten met zijn manoeuvre. De acceleratie van de links afslaande bestuurder is al maximaal.
- Het voertuigvolgmodel van de hoofdstroombestuurder van rechts reageert pas als het midden van de links afslaande bestuurder op de hoofdstroomrijbaan is en remt dus laat. Een verbeterd voertuigvolgmodel waar naar meer dan 1 hiaat wordt gekeken kan er voor zorgen dat eerder wordt gereageerd door de hoofdstroombestuurder.

De twee negatieve minimale TTC-waarden zijn als conflict meegeteld in de resultaten omdat er een reactie is van de hoofdstroombestuurder.

Samen met de discussie over de berekening van de PET-waarden lijkt een minimaal geaccepteerd hiaat van deze kruising te liggen rond de 3,3 seconden. Dit is mede afhankelijk van de overige gedragsmodellen.

### 6.3.5 MARS

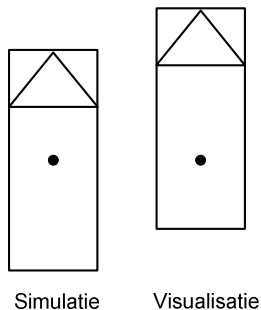
De simulatietijd van 0,1 seconde geeft afwijkingen in de posities van de voertuigen. Bij 50 km/u is de afwijking in voertuigposities 1,39 meter. Een kortere tijdstap geeft de posities gedetailleerder weer. Door het maximaal aantal voertuigen in simulatie van 26 kunnen geen grote verkeershoeveelheden worden doorgerekend.

De simulatieomgeving MARS biedt veel mogelijkheden om het gedrag van bestuurders in te programmeren. Een beperking is de lange simulatietijd, waardoor het niet mogelijk is om binnen beperkte tijd veel simulaties te draaien. Het simuleren van meerdere kruispunten is op dit moment nog niet mogelijk. Voor het gebruik van het hiaatacceptatiemodel te gebruiken zijn invoerbestanden nodig. Dit vergt veel kennis van het model en de simulatieomgeving.

## Visualisatie van de modeluitvoer

In de omrekening van de uitvoer van het simulatiemodel naar de visualisatie staan twee kwesties open.

De eerste kwestie betreft een conversie van de simulatie naar de visualisatie van voertuigen. In het simulatiemodel wordt een voertuig gerepresenteerd door zijn positie en afmetingen. De positie is één punt en representeert het midden van het voertuig. In de modelberekeningen worden de afmetingen van het voertuig vanaf het midden van het voertuig bepaald. In de visualisatie wordt de positie van het voertuig overgenomen uit de modelberekeningen. Maar in het visualisatiemodel wordt op deze positie niet het midden van een voertuig geplaatst, maar ongeveer de achteras van het voertuig, zie figuur 6-11. Dit geeft een afwijking van ongeveer 1 meter tussen de visualisatie en de modeluitvoer. De voertuigen zouden in de visualisatie een meter naar achter moeten worden geplaatst.



*Figuur 6-11 Posities van voertuigen in de simulatie en visualisatie*

De tweede kwestie is dat voertuigen in de modelberekeningen allemaal dezelfde afmetingen hebben (4,5 meter), maar in de visualisatie zijn ze van verschillende afmetingen. Het langste voertuig is 5 meter en de kortste 3,75 meter. Dit leidt tot een afwijkend beeld in de visualisatie, waardoor het kan lijken alsof het links afslaande voertuig laat reageert met optrekken.

De twee kwesties maken een visuele verificatie van het bestuurdersgedrag op kruisingen lastiger en minder betrouwbaar. In vervolgonderzoek moeten deze kwesties uitgezocht en opgelost worden, zodat de visualisatie exact de uitkomsten van de simulaties weergeeft.

## 6.4 Conclusies

Simulaties zijn uitgevoerd om te bepalen of het nieuwe hiaatacceptatiemodel veranderingen geeft in afgeleide veiligheidsindicatoren en wachttijd als meerdere hiaten worden meegenomen in de beslissing. Vier experimenten zijn gesimuleerd met elk een andere instelling van de mate van meewegen van de hiaten in de beslissing. Op basis van de resultaten van de simulaties kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het aantal conflicten daalt naarmate meer hiaten worden meegenomen in het beslissingsproces.
- Het aantal conflicten daalt licht naarmate de volgende hiaten zwaarder meewegen.
- Er doen zich alleen conflicten voor bij de twee kortste kritieke hiaten.
- De gemiddelde wachttijd per bestuurder per experiment verschilt nauwelijks.
- De gemiddelde wachttijd wordt 2 seconde langer bij het kortste kritieke hiaat als vier hiaten in de beslissing worden meegenomen.
- De gemiddelde wachttijd wordt korter bij de langere kritieke hiaten als twee hiaten in de beslissing worden meegenomen.
- Bij korte kritieke hiaten is de kans dat een volgend hiaat wordt gekozen groter dan bij lange kritieke hiaten. Hierdoor is de kans dat de wachttijd langer wordt groter bij korte kritieke hiaten dan bij lange kritieke hiaten, als meerdere hiaten in de beslissing worden geëvalueerd.
- Door meerdere hiaten mee te nemen in de beslissing worden enkele hiaten in de verkeersstroom wel geaccepteerd die niet geaccepteerd konden worden met één hiaat in de beslissing. Dit effect treedt al op bij twee hiaten in de beslissing.
- In een aantal verkeersstromen treedt geen verandering op in het gekozen hiaat door het nieuwe hiaatacceptatiemodel.

## Hoofdstuk 7      Conclusies en aanbevelingen

---

Dit onderzoek heeft willen bijdragen aan het realistischer weergeven van bestuurdersgedrag op een T-kruising in microsimulatiemodellen. De beslissing van een bestuurder om een kruising over te steken wordt gemodelleerd in het hiaatacceptatiemodel.

De doelstelling van dit onderzoek is het ontwikkelen van een realistisch hiaatacceptatiemodel voor links afslaan op een T-kruising in een simulatieomgeving, zodat verkeersveiligheidseffecten nauwkeuriger met microsimulatiemodellen kunnen worden ingeschat.

Aan de hand van de antwoorden op de onderzoeksvragen worden de conclusies kort weergegeven. Tot slot worden de aanbevelingen voor vervolgonderzoek gepresenteerd.

### **7.1    *Beantwoording van de onderzoeksvragen***

- A.      *Op welke manier kan de hiaatacceptatie van links afslaande bestuurders op een T-kruising realistischer worden gemodelleerd?*

In het hiaatacceptatiemodel wordt het oversteekgedrag van een bestuurder gemodelleerd binnen een microsimulatiemodel. Het begrip kritiek hiaat staat centraal in de beslissing om een kruising over te steken. Het kritieke hiaat is de drempel waarop een bestuurder beslist of een hiaat in de verkeersstroom wordt geaccepteerd of geweigerd. Het kritieke hiaat moet worden geschat op basis van observaties uit de werkelijkheid. Vijf invloedsfactoren op het kritieke hiaat zijn onderscheiden op basis van de literatuurstudie. De eerste twee factoren zijn de leeftijd en geslacht van een bestuurder. De derde en vierde factor zijn de snelheid in en intensiteit van de hoofdstroom. De vijfde factor betreft een interactie-effect tussen de leeftijd van de bestuurder en de snelheid in de hoofdstroom. De invloedsfactoren zijn niet meegenomen in de implementatie van het hiaatacceptatiemodel door het ontbreken van gedetailleerde gegevens. Om verschillen tussen bestuurders in het kritieke hiaat weer te geven wordt een stochastische kansverdeling aangehouden voor het kritieke hiaat.

In het bestaande hiaatacceptatiemodel wordt door de bestuurder alleen het eerste hiaat in de verkeersstroom afgewogen tegen het kritieke hiaat. Dit lijkt niet erg realistisch en voor verbetering vatbaar door meerdere hiaten in de beslissing mee te laten wegen.

De vernieuwing van het hiaatacceptatiemodel bestaat uit het feit dat meerdere hiaten in de beslissing van de bestuurder worden meegenomen. De bestuurder neemt vier hiaten uit de verkeersstroom mee in zijn beslissing en weegt ze af ten opzichte van het kritieke hiaat. De positie van de hiaten in de verkeersstroom beperkt de aantrekkelijkheid van de hiaten. Het meest aantrekkelijke hiaat wordt door de bestuurder gekozen.



*B. Op welke wijze kan de conflicttheorie in microsimulatiemodellen gebruikt worden om verkeersveiligheidseffecten in te schatten?*

In microsimulatiemodellen kunnen conflicten tussen voertuigen een beeld geven van verkeersveiligheidseffecten. Een conflict is een situatie waarin het risico op een botsing aanwezig is als beide bestuurders geen actie ondernemen. De ernst van een conflict kan met afgeleide veiligheidsindicatoren worden bepaald. Literatuuronderzoek wijst uit dat het bestuurdersgedrag in microsimulatiemodellen verbeterd moet worden om de afgeleide veiligheidsindicatoren te kunnen gebruiken als maat voor de verkeersveiligheid. De verbetering bestaat uit meer nauwkeurige voertuigposities en meer variatie tussen en in de bestuurders in microsimulatiemodellen. De afgeleide veiligheidsindicatoren time-to-collision en post-encroachment-time worden gebruikt in de schatting van de verkeersveiligheid op de T-kruising.

De simulatieomgeving Multi-Agent Real-time Simulator (MARS) van TNO is een omgeving waarin voor elk voertuig een eigen gedragsmodel kan worden geprogrammeerd. Dit maakt het mogelijk om het hiaatacceptatiegedrag en het overige rijgedrag zeer gedetailleerd te modelleren. MARS zit in de ontwikkelingsfase en dat heeft het noodzakelijk gemaakt om naast het hiaatacceptatiegedrag ook modellen te ontwikkelen voor het overige rijgedrag op de kruising van bestuurder en hoofdstroombestuurder.

De conflicttheorie kan door middel van afgeleide veiligheidsindicatoren gebruikt worden in microsimulatiemodellen om de verkeersveiligheid in te schatten. De afgeleide veiligheidsindicatoren time-to-collision en post-encroachment-time zijn goed bruikbaar als de voertuigposities correct door het simulatiemodel worden weergegeven.

*C. In hoeverre leidt het nieuwe hiaatacceptatiemodel tot een nauwkeuriger inschatting van de verkeersveiligheidseffecten ten opzichte van het bestaande model?*

Het nieuwe hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing van de bestuurder is vergeleken met het model met één hiaat in de beslissing door middel van experimenten. De variatie tussen bestuurders is weergegeven door zeven kritieke hiaten uniform verdeeld tussen de 3 en 8,1 seconden.

In het experiment met het bestaande model waarin alleen het eerste hiaat wordt geëvalueerd, ontstaan alleen conflicten bij korte kritieke hiaten. De wachttijd wordt langer naarmate het kritieke hiaat langer wordt. In experiment met het nieuwe model waarin bestuurders vier hiaten meenemen in de beslissing en deze het zwaarst meewegen, is het aantal conflicten het laagst. De gemiddelde wachttijd per kritiek hiaat is nauwelijks veranderd tussen het bestaande en het nieuwe model.

Meerdere hiaten in de beslissing hebben als effect dat sommige hiaten worden geweigerd, omdat een aantrekkelijker hiaat volgt. Dit is een vooraf verwacht effect. Een ander effect is de acceptatie van een aantal hiaten die in het referentie experiment werden geweigerd. Het laatstgenoemde effect was niet van te voren verwacht.

Tussen de kritieke hiaten is veel verschil in de verandering van de gemiddelde wachttijd als meerdere hiaten in de beslissing worden meegenomen. In het geval van het kortste kritieke hiaat is een significante stijging van de gemiddelde wachttijd met 2 seconden als vier hiaten worden meegenomen in de beslissing. De gemiddelde wachttijd van het kritieke hiaat van 5,5 seconden daalt significant met 1,5 seconden bij twee hiaten in de beslissing.

Op basis van de resultaten van de simulaties kan worden geconcludeerd dat het nieuwe hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing een goed beeld geeft van het bestuurdersgedrag. Het aantal conflicten daalt en de gemiddelde wachttijd verschilt nauwelijks. Om daadwerkelijk de afgeleide veiligheidsindicatoren nauwkeurig te bepalen moet ook het overige rijgedrag realistischer worden geïmplementeerd.

## **7.2 Conclusies**

Op basis van de onderzoeksvragen kan het volgende worden geconcludeerd.

Het vernieuwde hiaatacceptatiemodel is realistischer doordat in de beslissing van de bestuurder de verkeersstroom wordt meegenomen en niet alleen de eerste mogelijkheid.

De conflicttheorie kan door middel van afgeleide veiligheidsindicatoren gebruikt worden in de simulatieomgeving MARS om de verkeersveiligheid in te schatten.

Het vernieuwde hiaatacceptatiemodel met meerdere hiaten in de beslissing geeft een hogere verkeersveiligheid en een nauwelijks veranderende verkeersafwikkeling. Daarbij geeft het vernieuwde model een goed beeld van het rijgedrag van de bestuurders in de simulatie.

De implementatie van het hiaatacceptatiemodel en het overige rijgedrag van de bestuurder en hoofdstroombestuurders moeten worden getoetst aan het rijgedrag uit de werkelijkheid. Dan pas kunnen uitspraken worden gedaan of het nieuwe hiaatacceptatiemodel meer overeen komt met de werkelijkheid en verkeersveiligheidseffecten nauwkeuriger kunnen worden ingeschat.

### **7.3 Aanbevelingen**

De conclusie uit het onderzoek luidt dat het hiaatacceptatiemodel realistischer is ten opzichte van het bestaande hiaatacceptatiemodel en dat het vernieuwde model veranderingen geeft in de uitkomsten van de afgeleide veiligheidsindicatoren en de wachttijd. In de discussie van de simulatieresultaten in paragraaf 6.3 zijn enkele aanbevelingen gedaan ten aanzien van de verdere verbetering en aanvulling van het hiaatacceptatiemodel en de implementatie.

Naast deze modelspecifieke aanbevelingen zijn er nog veel onderdelen die verbetering behoeven om de daadwerkelijke verkeersveiligheidseffecten van ADA-systemen te kunnen simuleren.

Het geïmplementeerde bestuurdersgedrag moet gecalibreerd en gevalideerd worden met data en rijgedrag uit de werkelijkheid. Daarbij lijken gegevens gebaseerd op automatische verwerking van videobeelden van kruisingen een belangrijke databron om het gedrag op te toetsen. Deze gegevens zijn voor kruisingen op dit moment nog niet beschikbaar, maar waarschijnlijk in de nabije toekomst wel. Een van de mogelijkheden tot validatie van het gedrag is het aantal conflicten in werkelijkheid en in microsimulatiemodellen te vergelijken op kruisingen.

Niet alleen het gedrag van de invoegende bestuurder behoeft verdere ontwikkeling, ook het gedrag van de bestuurders in de verkeersstroom moet op een meer realistische wijze worden weergegeven. Daarbij is een voertuigvolgmodel dat rekening houdt met het gedrag van het overstekende verkeer een belangrijk onderdeel.

Een volgende stap in het modelleren van realistisch bestuurdersgedrag bestaat uit het meenemen van fouten die bestuurders in werkelijkheid maken. Deze toevoeging is zeer complex, omdat het normale gedrag al zeer lastig te beschrijven is. Het zijn echter wel vaak de fouten of vergissingen van bestuurders die leiden tot ongevallen.

Een model voor het kritieke hiaat dat niet is gebaseerd op een kansverdeling biedt de mogelijkheid de gedragingen van bestuurders beter weer te geven. Het zou een deterministisch model kunnen zijn. Voorwaarde voor een dergelijk model is dat er genoeg gegevens beschikbaar zijn. Een ander issue is de vraag of het bestuurdersgedrag niet te ingewikkeld is om gevat te kunnen worden in één deterministisch model. In de ontwikkeling van een dergelijk model is een team van verschillende disciplines als psychologen, verkeerskundigen en informatici onontbeerlijk.

De simulatieomgeving MARS dient verder ontwikkeld te worden om de omgeving te kunnen gebruiken in het evalueren van verkeersveiligheidseffecten. Het moet mogelijk zijn om meer voertuigen tegelijkertijd te simuleren en de simulatietijd moet versneld worden. Het model zou zelfstandig moeten kunnen draaien zonder dat daarbij veel invoerbestanden vooraf gecreëerd moeten worden. Een koppeling van het kruispuntmodel in MARS met een microsimulatiemodel kan een oplossing zijn om netwerkeffecten te bepalen en gedetailleerd de verkeersveiligheidseffecten op kruisingen te bepalen.

In de resultaten van de simulaties geeft de afgeleide veiligheidsindicator PET een goed beeld van de conflicten, maar de PET-waarde wordt niet exact berekend volgens de definitie. In vervolgonderzoek moet dit nader onderzocht worden.

Het is nodig om het hiaatacceptatiemodel uit te breiden voor meerdere typen kruisingen en manoeuvres, zoals andere voorrangsregelingen en rechts afslaan. Het gedrag van naderende bestuurders moet geprogrammeerd worden evenals het bestuurdersgedrag in een wachtrij.

Om de verkeersveiligheidseffecten van ADA-systemen daadwerkelijk te kunnen onderzoeken in een simulatieomgeving is een correcte implementatie van het rijgedrag met een ADA-systemen in het model nodig. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met de mogelijke effecten van de systemen op korte en lange termijn op het rijgedrag van de bestuurder.

## Referenties

---

- Abdoelbasier, A. (2006). The Intersection Micro-simulator. Development of a model of driver behaviour on intersections. Delft, Delft University of Technology.
- Abou-Henaidy, M., *et al.* (1994). Gap acceptance investigations in Canada. Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity., Sydney, Australia, Australian Road Research Board and U.S. Transportation Research Board.
- Alexander, J., *et al.* (2002). "Factors influencing the probability of an incident at a junction: Results from an interactive driving simulator." Accident Analysis and Prevention **34**(6): 779-792.
- Amundsen, F. en C. Hydén (1977). Proceedings of First Workshop on Traffic Conflicts, Oslo, Norway, Institute of Transport Economics
- Archer, J. (2005). Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections. Stockholm, Royal Institute of Technology.
- AuteurOnbekend. (2007). "Syllabus "Hoofdstuk 5 Random getallen en trekkingen uit kansdichtheidsfuncties"." Mathematische Simulatie Geraadpleegd 27 november 2007 2007, op <http://www.fdaw.unimaas.nl/education/2.4ms/hfdst5.pdf>.
- Brilon, W., *et al.* (1997). Useful Estimation Procedures for Critical Gaps. Proceedings of the 3rd International Symposium on Intersections without Traffic Signals, Portland Oregon.
- Brilon, W. en A. Weinert (2001). "Ermittlung aktueller grenz- und folgezeitlücken für ausserortsknoten ohne lichtsignalanlagen." Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **828**.
- Caird, J. K. en P. A. Hancock (2002). Left-turn and gap acceptance crashes. Human factors in traffic safety. R. E. Dewar and P. Olson. Tucson, AZ, Lawyers & Judges Publishing: 613-652.
- Cassidy, M. J., *et al.* (1995). "Unsignalized intersection capacity and level of service: Revisiting critical gap." Transportation Research Record **1484**: 16-23.
- Chandrasekhar, S. en G. H. Bahm (2007). Evaluation of dual regime acceleration model applied to left turning vehicles. 18th IASTED International Conference Modelling and Simulation, Montreal, Quebec, Canada.
- Chin, H.-C. en S.-T. Quek (1997). "Measurement of traffic conflicts." Safety Science **26**(3): 169-185.
- Darzentas, J., *et al.* (1980). "Minimum acceptance gaps and conflict involvement in a single crossing manoeuvre." Traffic Engineering and Control **21**: 58-61.
- Davis, G. A. en T. Swenson (2004). "Field study of gap acceptance by left-turning drivers." Transportation Research Record(1899): 71-75.
- Drolenga, H. (2005). Het ontwerp van een verkeersveiligheidsindicator van routes. Enschede, Universiteit Twente.
- Gettman, D. en L. Head (2003). Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models. FHWA-RD-03-050, Tucson, Siemens Gardner Transportation Systems.
- Gettman, D. en L. Pu (2006). Theoretical validation of Surrogate Safety Assessment Methodology for roundabouts and cross intersections. ITS World Conference, London.
- Glauz, W. D. en D. Harwood (1999). Chapter 3 Vehicles. Traffic Engineering Handbook- 5th ed. J. L. Pline. Washington D.C., Institute of Transportation Engineers: 50-77.

- Harwood, D., *et al.* (2000). "Sight Distance for Stop-Controlled Intersections Based on Gap Acceptance." Transportation Research Record **1701**(-1): 32-41.
- Hidas, P. (2005). Modelling Individual Behaviour In Microsimulation Models. 28th Australasian Transport Research Forum, Sydney, Transport and Population Data Centre, Department of Planning NSW.
- Janssen, S. T. M. C. (2004). Veiligheid op kruisingen van verkeersaders binnen de bebouwde kom, Leidschendam, SWOV.
- Koppa, R. J. (1999). "Human Factors." Chapter 3 of Revised Monograph on Traffic Flow Theory Geraadpleegd 13 november 2007, op <http://www.tfhrc.gov/its/tft/tft.htm>.
- Kraay, J. H., *et al.* (1986). Handleiding Conflictobservatietechniek DOCTOR. (Dutch objective conflict technique for operation and research). Deel I. Methode en toepassingsbereik. Leidschendam, SWOV.
- Laberge, J. C., *et al.* (2006). "Design of an intersection decision support (IDS) interface to reduce crashes at rural stop-controlled intersections." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **14**(1): 39-56.
- Liu, R. (2005). Dracula 2.3. User Manual, Leeds, Institute for Transport Studies. University of Leeds.
- Mahmassani, H. en Y. Sheffi (1981). "USING GAP SEQUENCES TO ESTIMATE GAP ACCEPTANCE FUNCTIONS." Transportation Research, Part B: Methodological **15 B**(3): 143-148.
- McDowell, M. R. C., *et al.* (1983). Gap acceptance and traffic conflict simulation as a measure of risk. TRL Report No. SR 776, Crowthorne, UK, Transport and Road Research Laboratory.
- Minderhoud, M. M. en P. H. L. Bovy (2001). "Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment." Accident Analysis & Prevention **33**(1): 89-97.
- Morsink, P. L. J. en L. J. J. Wismans (2008). Verkeersmodellen en verkeersveiligheid, Leidschendam, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, In druk.
- Olson, P. (2002). Driver Perception-Response Time. Human factors in traffic safety. R. E. Dewar and P. Olson. Tucson, AZ, Lawyers & Judges Publishing: 43-76.
- Papp, Z., *et al.* (2006). Scalable HIL Simulator for Multi-Agent Systems Interacting in Physical Environments. Proceedings of the 2006 IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems, Praag, Tsjechië.
- Polus, A. (1983). "Gap acceptance characteristics at unsignalized urban intersections." Traffic Engineering and Control **24**(5): 255-258.
- PTV (2007). User Manual VISSIM version 4.30, Karlsruhe, Germany.
- Reijmers, H. J. (2006). "Syllabus 'Traffic Guidance Systems' Hoofdstuk 9 Stochastic aspects." Geraadpleegd 20 november 2007, op <http://www.pn.ewi.tudelft.nl/education/et4-024/notes/h9.pdf>.
- Sayed, T., *et al.* (1994). "Simulation of traffic conflicts at unsignalized intersections with TSC-Sim." Accident Analysis and Prevention **26**(5): 593-607.
- SIAS (2007). S-Paramics 2007 Reference Manual. Edinburgh, UK.
- Siegel, S. en N. J. J. Castellan (1988). Nonparametric statistics for the behavioral sciences, McGraw-HILL Book Company, Singapore.

- Spek, A. C. E., *et al.* (2006). "Intersection approach speed and accident probability." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **9**(2): 155-171.
- Staplin, L. (1995). "Simulator and field measures of driver age differences in left-turn gap judgments." Transportation Research Record **1485**: 49-55.
- SWOV. (2008). "Jonge, beginnende automobilisten." Geraadpleegd 10 april 2008, op [http://www.swov.nl/nl/research/kennisbank/inhoud/30\\_risco/jonge\\_beginnende\\_automobilisten.htm](http://www.swov.nl/nl/research/kennisbank/inhoud/30_risco/jonge_beginnende_automobilisten.htm).
- Troutbeck, R. J. en W. Brilon (1999). Unsignalized intersection theory. Revised monograph on traffic flow theory. N. Gartner, C. Messer and A. K. Raiti, US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Van Arem, B. (1986). Een stochastisch model voor wachttijden van invoegend verkeer. Enschede, Universiteit Twente.
- Van Arem, B., *et al.* (2007). Design and Evaluation of an Integrated Full-Range Speed Assistant. 2007-D-R0280/B, Delft, TNO.
- Van der Horst, A. R. A. (1990). A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters. Delft, TU Delft.
- Wang, J., *et al.* (2004). "Normal Acceleration Behavior of Passenger Vehicles Starting from Rest at All-Way Stop-Controlled Intersections." Transportation Research Record **1883**(-1): 158-166.
- Yan, X., *et al.* (2007). "Effects of major-road vehicle speed and driver age and gender on left-turn gap acceptance." Accident Analysis and Prevention **39**(4): 843-852.

## Bijlage A Implementatie Erlang-2 verdeling in Excel

---

In deze bijlage is de implementatie van de gekozen voertuigvolgtijdverdeling Erlang (2,  $\mu$ ) in Excel beschreven.

De Erlang (2,  $\mu$ ) verdeling kan worden gesimuleerd door 2 onafhankelijke trekkingen uit een negatief exponentiële verdeling ( $\mu/2$ ) op te tellen (Reijmers, 2006).

Om de volgtijden te genereren is in Excel de volgende procedure ingevoerd.

$$\mu = 3600 / I \quad (A-1)$$

I = Intensiteit (zelf te bepalen)

Om een negatief exponentiële verdeling te simuleren is de inverse nodig van de cumulatieve kansdichtheidsfunctie, zie vergelijking (A-2). Op basis van deze distributiefunctie kan een functie voor de volgtijd t worden afgeleidt, zie formule (A-3) (AuteurOnbekend, 2007).

$$F(t) = 1 - e^{-t/\mu} \quad (A-2)$$

$$t = -\mu \ln(1-u) \quad (A-3)$$

De term 1-u kan vervangen worden door u omdat beiden getallen random uniform zijn verdeeld (AuteurOnbekend, 2007).

Om trekkingen uit een Erlang-(2,  $\mu$ ) verdeling te nemen moeten de volgende stappen worden doorlopen (AuteurOnbekend, 2007).

1. Genereer 2 random getallen uit uniform (0,1) verdeling.
2. Genereer met de random getallen 2 exponentieel ( $\mu/2$ ) verdeelde variabelen t

$$t = -\mu \ln(u) \quad (A-4)$$

3. Sommeer de uitkomsten van de 2 negatief exponentiële verdelingen.

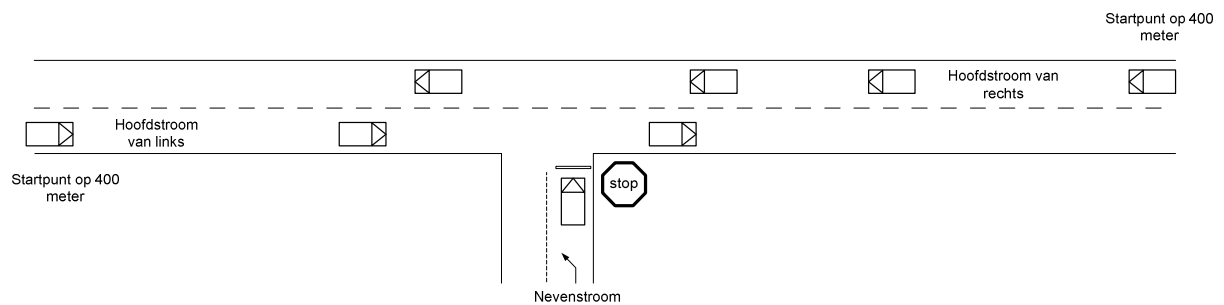
$$\text{volgtijd} = \sum_{i=1}^2 t_i \quad (A-5)$$

De randomgetallen zijn in Excel 2003 gegenereerd door de functie 'A-selecte getallen' in 'Gegevensanalyse' in het menu 'Extra'. Met behulp van een gekozen seed(1000 in dit onderzoek) is uit de uniforme verdeling ( $1 \cdot 10^{-34}$ , 1) een random getal getrokken. Er is gewerkt met  $1 \cdot 10^{-34}$  als ondergrens van de verdeling omdat het logaritme van 0 niet bestaat en er dan geen volgtijd berekend wordt. Alle volgtijden kleiner dan 1 seconde zijn op 1 seconde gezet.



Voor de hoofdstroom van recht en de hoofdstroom van links zijn een verschillende set random getallen gebruikt gebaseerd op dezelfde seed. Het eerste random nummer wordt niet gebruikt.

De volgtijden zijn omgerekend naar starttijden waarin elk voertuig start in de hoofdstroom. De hoofdstroomvoertuigen die binnen de eerste 30 seconden starten, worden geplaatst in de hoofdstroom en starten niet aan het begin van de hoofdstroom, zie figuur A-1. Op deze manier krijgt een bestuurder op  $t=0$  meteen een verkeersstroom voor zich. De startlocatie van het eerste hoofdstroomvoertuig is 16,7 meter voorbij het midden van de kruising. Dit is 30 seconden maal de constante snelheid van 13,89 m/s vanaf de start van de hoofdstroom 1. De volgende hoofdstroomvoertuigen worden geplaatst naar rato van de voertuigvolgtijd, maar dan 30 seconden-voertuigvolgtijd maal 13,89 m/s. Op  $t=0$  is de verkeersstroom al gevuld met voertuigen.

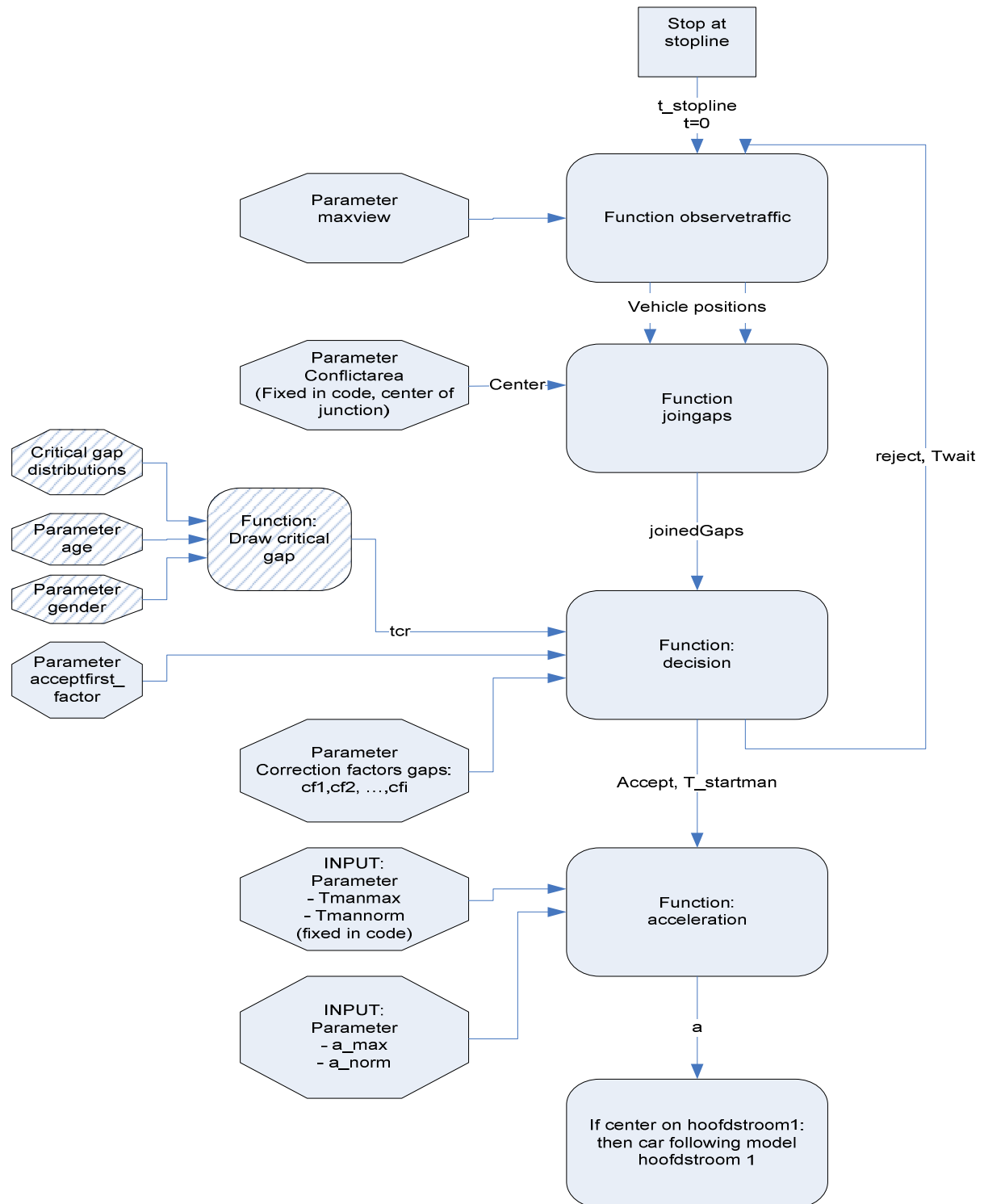


*Figuur A-1 Startsituatie van een run (posities van voertuigen afhankelijk van verdeling verkeersstroom)*

De volg- en starttijden van de hoofdstroomvoertuigen worden met behulp van een macro in Excel berekend in het invoerbestand.

## Bijlage B Statediagram en functies

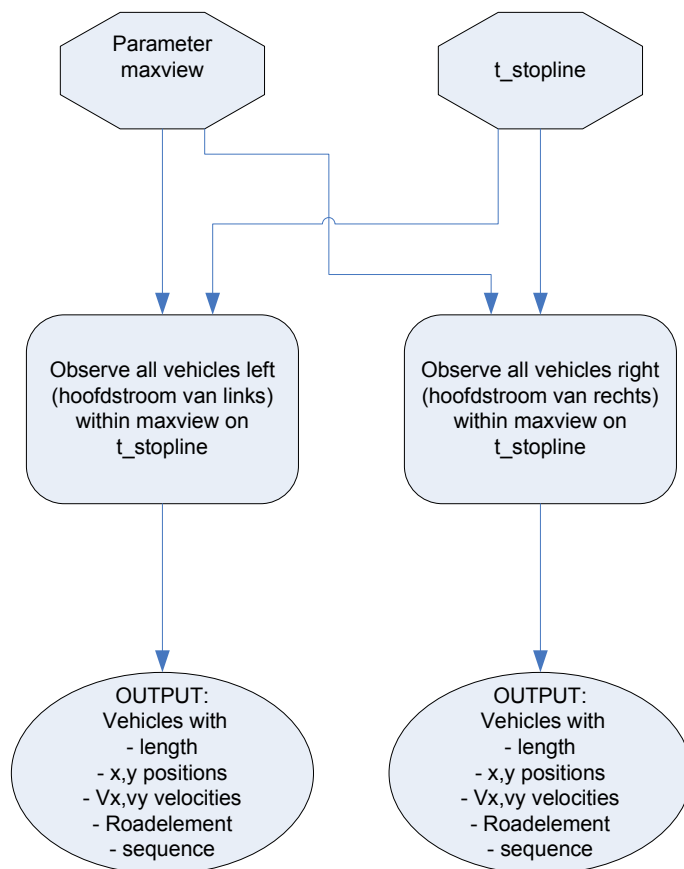
Het statediagram gepresenteerd in paragraaf 5.6 bestaat uit een aantal functies. In deze bijlage wordt het statediagram en de bijbehorende functies gepresenteerd met een korte beschrijving. Het principe van de meerdere hiaten in de beslissing uit paragraaf 4.2 en de aannames beschreven in paragraaf 5.1 en 5.4 liggen ten grondslag aan de functies.



Figuur B-1 Statediagram

## B.1 Functie observetraffic

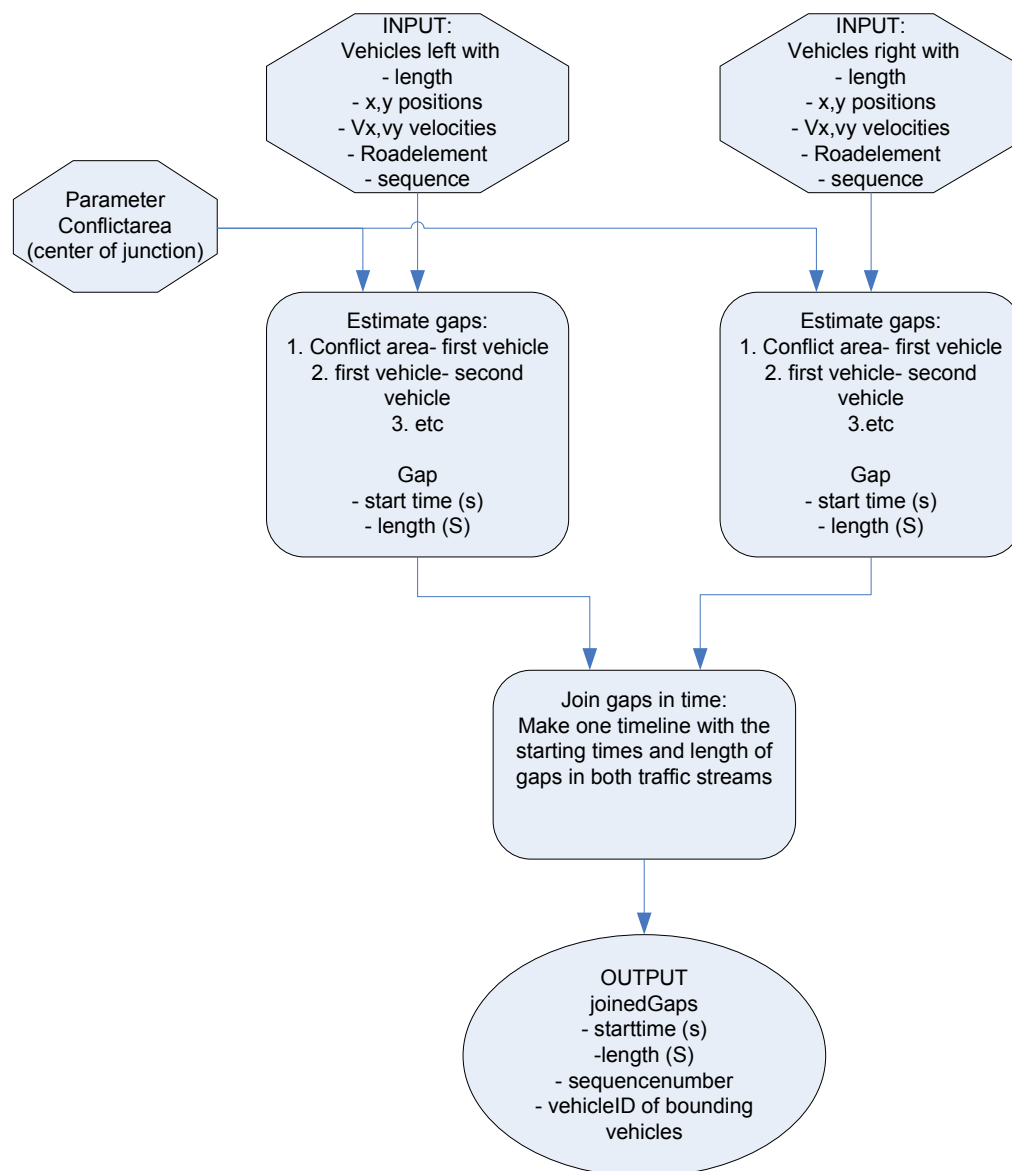
In de functie observe traffic bekijkt de bestuurder het verkeer op beide hoofdstromen. De parameter maxview bepaalt binnen welke afstand een bestuurder de verkeersstroom kan zien. Deze parameter staat default staat op de lengte van de hoofdstroom, in dit onderzoek 400 meter. De bestuurder schat de afstanden en snelheden van de hoofdstroomvoertuigen perfect in. Alle voertuigen en bijbehorende posities en snelheden die de bestuurder ziet worden in de volgende functie gebruikt.



Figuur B-2 Functie observetraffic

## B.2 Functie joingaps

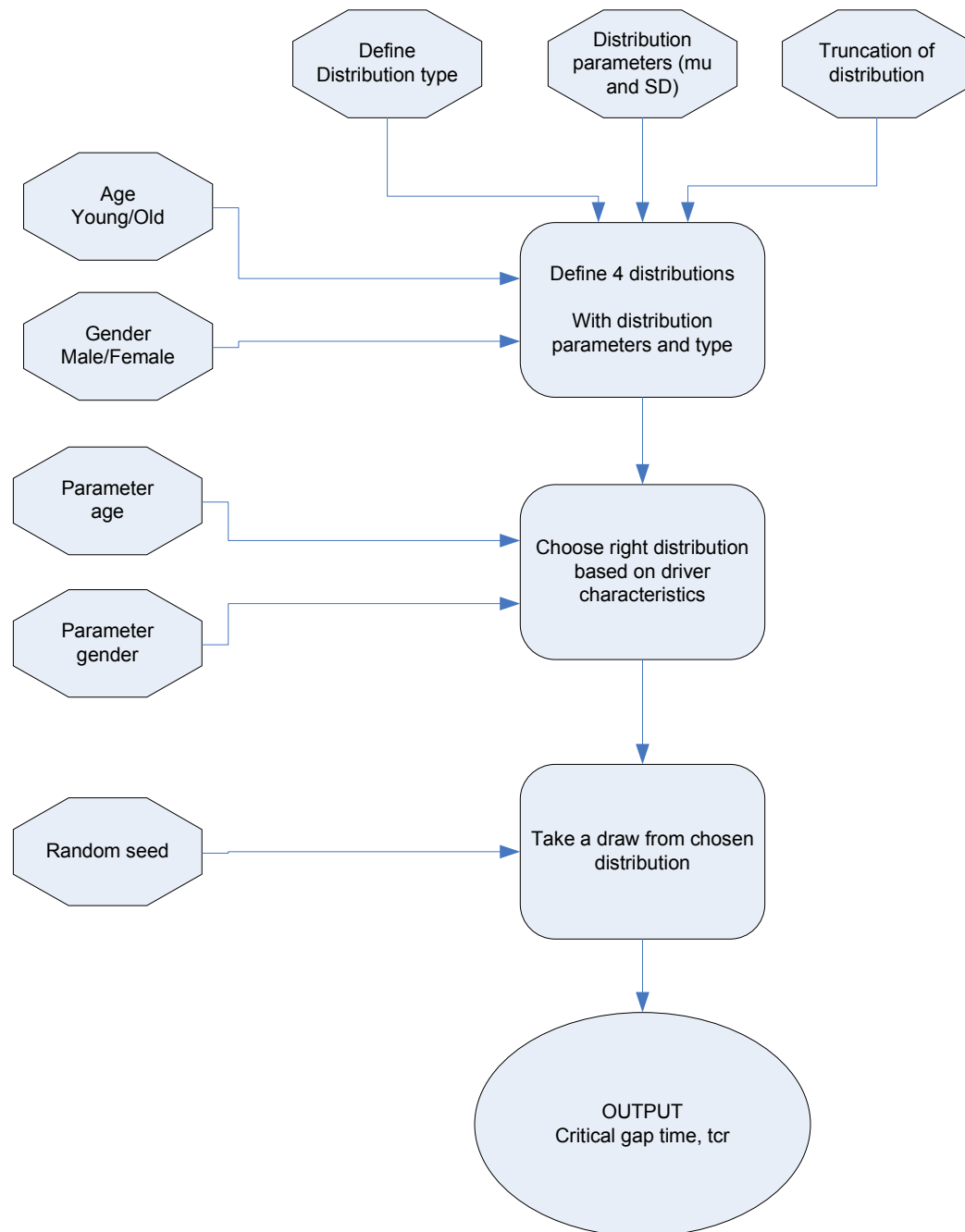
De voertuigposities en snelheden leggen de hiaten in beide hoofdstromen vast. Daarbij wordt de huidige positie en snelheid van elk hoofdstroomvoertuig gebruikt. De tijdsduur van het eerste hiaat wordt bepaald vanaf het centrum van de kruising tot de voorkant van het eerste voertuig. Met behulp van de hiaten in de twee hoofdstromen wordt een combinatie gemaakt voor het hiaat in de verkeersstroom. De bestuurder evalueert dit gecombineerde hiaat. De uitvoer van deze functie is een overzicht in de tijd waarin aangegeven staat dat beide stromen een hiaat beschikbaar hebben. Dit wordt in de functie decision gebruikt.



Figuur B-3 Functie joingaps

### B.3 Functie drawcriticalgap

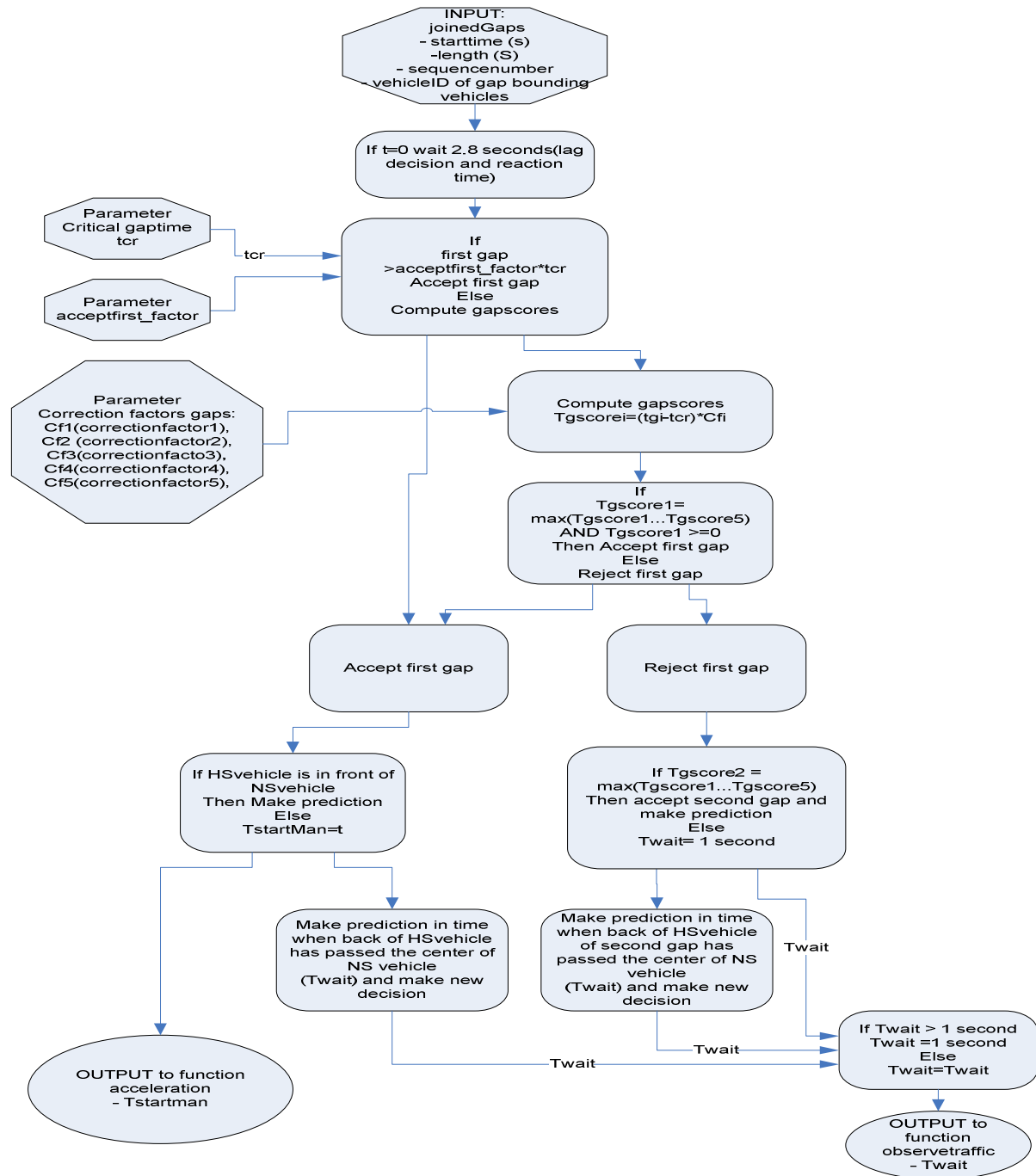
Deze functie is niet geïmplementeerd in het model in de simulatieomgeving. De invoerbestanden kunnen wel op basis van een verdeling een kritiek hiaat genereren voor elke bestuurder. In vervolgonderzoek kan deze functie worden geïmplementeerd. Het kritieke hiaat dient als invoer van de functie decision.



Figuur B-4 Functie drawcriticalgap

## B.4 Function decision

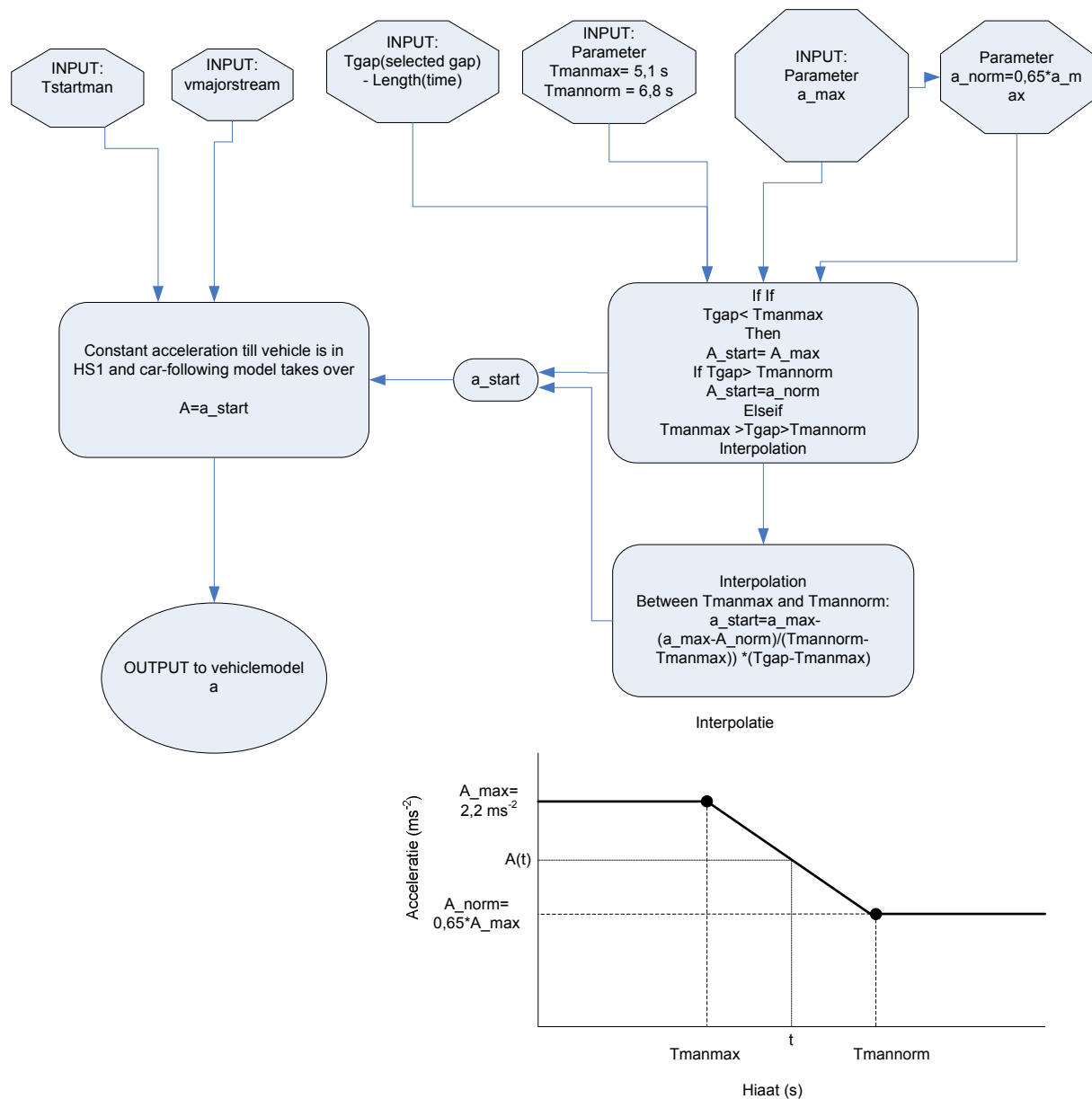
In deze functie beslist de bestuurder om een gecombineerd hiaat in de verkeersstroom te accepteren of te weigeren. Het eerste besluit valt na 2,8 seconde genomen en de volgende beslissingen elke seconde. De gecombineerde hiaten in de verkeersstroom worden vergeleken met het kritieke hiaat en gescoord volgens het beslismodel. De bestuurder accepteert het hiaat met de hoogste score en start de manoeuvre als er geen voertuig voor de bestuurder aanwezig is. Als het eerste hiaat niet geschikt is wordt het geweigerd en wordt er terug gegaan met functie observetraffic.



Figuur B-5 Functie decision

## B.5 Function acceleration

Op basis van de lengte van het gekozen hiaat bepaald de bestuurder de versnelling die de hele manoeuvre wordt aangehouden.



Figuur B-6 Functie acceleratie

## Bijlage C Invoer van het simulatiemodel

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de invoerbestanden met daarin de instellingen en parameters die het simulatiemodel gebruikt.

Er zijn zeven invoerbestanden, zie tabel C-1. Drie voor de bestuurders in de nevenstroom en twee voor elke hoofdstroom. Elke regel in een bestand geeft een bestuurder met voertuig weer. De bestanden zijn gekoppeld met elkaar via het veld `track_ID`.

*Tabel C-1 Invoerbestanden simulatiemodel*

| Naam invoerbestand                             | Omschrijving                                                                                                                | Extensie |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Nevenstroom track                              | Startgegevens van elk voertuig in nevenstroom, waaronder starttijd, positie, richting.                                      | .trk     |
| Nevenstroom advanced cruise control            | Parameters van voertuigvolgmodel van elk voertuig in nevenstroom.                                                           | .acc     |
| Nevenstroom gap acceptance model               | Parameters van het hiaatacceptatiemodel, waaronder bestuurderskenmerken, kritiek hiaat, weegfactoren, maximale versnelling. | .gam     |
| Hoofdstroom van rechts track                   | Startgegevens van elk voertuig in hoofdstroom van rechts, waaronder starttijd, positie, richting.                           | .trk     |
| Hoofdstroom van rechts advanced cruise control | Parameters van voertuigvolgmodel van elk voertuig in hoofdstroom van rechts                                                 | .acc     |
| Hoofdstroom van links track                    | Startgegevens van elk voertuig in hoofdstroom van links, waaronder starttijd, positie, richting.                            | .trk     |
| Hoofdstroom van links advanced cruise control  | Parameters van voertuigvolgmodel van elk voertuig in hoofdstroom van links                                                  | .acc     |



## C.1 Nevenstroom bestanden

### Trackbestand

Dit invoerbestand geeft de start van het nevenstroomvoertuig aan in de simulatie. De starttijd, locatie en initiële snelheid worden hier gedefinieerd, zie tabel C-2. De koppeling met de andere bestanden is via de Track ID kolom.

Tabel C-2 Nevenstroom trackbestand

| kolomnummer | kolomnaam  | omschrijving                    | waarde                                                                             |
|-------------|------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Track ID   | nummer van het voertuig         | voertuignummer                                                                     |
| 2           | id.width   | breedte vtg                     | 1,8 m                                                                              |
| 3           | id.length  | lengte vtg                      | 4,5 m                                                                              |
| 4           | id.type    | type vtg                        | 10(personenwagen)                                                                  |
| 5           | id.t0      | begin tijd                      | kiezen                                                                             |
| 6           | id.tend    | eindtijd                        | Als vtg 200 meter voorbij kruising is.                                             |
| 7           | id.x0      | start positie x-richting        | -1.75                                                                              |
| 8           | id.y0      | start positie y-richting        | 10                                                                                 |
| 9           | id.heading | Heading (richting van voertuig) | Oriëntatie in xyz coördinaten in radialen.<br>stroom 3 rijdt in heading = $-\pi/2$ |
| 10          | id.vx0     | start snelheid x-richting       | 0                                                                                  |
| 11          | id.vy0     | start snelheid y-richting       | 0                                                                                  |
| 12          | id.ax0     | start versnelling x-richting    | 0                                                                                  |
| 13          | id.ay0     | start versnelling y-richting    | 0                                                                                  |

### Advanced cruise control bestand

In dit bestand staan de instellingen voor het voertuigvolgmodel, zie tabel C-3. Dit model treedt in werking als het nevenstroomvoertuig op de rijbaan van hoofdstroom van rechts is.

Tabel C-3 Nevenstroom advanced cruise control bestand (.acc)

| kolomnummer | kolomnaam   | omschrijving                                  | waarde                            |
|-------------|-------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1           | Track ID    | nummer van het voertuig                       | voertuignummer                    |
| 2           | timeheaddes | Time-headway desired                          | 0.4                               |
| 3           | S0          | Minimale gewenste afstand tot voorafgaand vtg | 3 meter (default)                 |
| 4           | vcr         | Gewenste kruissnelheid                        | $13.89 \text{ ms}^{-1}$ (50 km/u) |

### Gap acceptance model bestand

In tabel C-4 staan alle parameterwaarden die in het hiaatacceptatiemodel gebruikt worden. In deze studie wordt er niet gevarieerd in geslacht en leeftijd. In vervolgstudie kan dit wel. Dit moet dan wel geïmplementeerd worden.

Tabel C-4 Nevenstroom gap acceptance model bestand(.gam)

| kolomnummer | parameternaam     | omschrijving                                                                                                                | waarde                                                          |
|-------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1           | Track ID          | koppeling naar tracktable                                                                                                   | voertuignummer                                                  |
| 2           | maxView           | Maximale afstand waarbinnen een nevenstroom voertuig een hoofdstroom voertuig kan zien. Gerekend vanaf midden van voertuig. | 400 meter                                                       |
| 3           | gender            | Geslacht van bestuurder                                                                                                     | man =0                                                          |
| 4           | age               | leeftijd                                                                                                                    | 60                                                              |
| 5           | TGapCritical      | Trekking van kritiek hiaat uit verdeling                                                                                    | Uit verdeling met minimum van 1 seconde.                        |
| 6           | acceptFirstFactor | factor waarboven 1e hiaat hiaat sowieso wordt geaccepteerd.                                                                 | Maximaal (9999), zodat parameter geen invloed heeft.            |
| 7           | correctionFactor1 | weegfactor voor eerste hiaat                                                                                                | afhankelijk van experiment                                      |
| 8           | correctionFactor2 | weegfactor voor tweede hiaat                                                                                                | afhankelijk van experiment                                      |
| 9           | correctionFactor3 | weegfactor voor derde hiaat                                                                                                 | afhankelijk van experiment                                      |
| 10          | correctionFactor4 | weegfactor voor vierde hiaat                                                                                                | afhankelijk van experiment                                      |
| 11          | correctionFactor5 | weegfactor voor vijfde hiaat                                                                                                | afhankelijk van experiment                                      |
| 12          | aMax              | maximale versnelling                                                                                                        | $2,2 \text{ ms}^{-2}$                                           |
| 13          | aNormal           | normale versnelling                                                                                                         | $0.65 \cdot a_{\text{max}}$<br>(anders $1.43 \text{ ms}^{-2}$ ) |
| 14          | tGapNormal        | Niet van toepassing                                                                                                         | Niet van toepassing                                             |

## C.2 Hoofdstroom bestanden

De structuur van de twee bestanden van elke hoofdstroom zijn identiek aan elkaar. Een aantal waarden zijn verschillend voor de hoofdstroom van rechts en links. Een verschil in instellingen is in de kolom 'waarde' aangegeven in tabel C-5 en C-6.

### Track bestand

In dit bestand wordt de startposities en gegevens van de voertuigen op de hoofdstroom weergegeven, zie tabel C-5.

Tabel C-5 Hoofdstroom trackbestand

| kolomnummer | kolomnaam  | omschrijving                               | waarde                                                                                            |
|-------------|------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | id.track   | nummer van het voertuig.                   | voertuignummer                                                                                    |
| 2           | id.width   | breedte vtg                                | 1,8 m                                                                                             |
| 3           | id.length  | lengte vtg                                 | 4,5 m                                                                                             |
| 4           | id.type    | type vtg                                   | 10(personenwagen)                                                                                 |
| 5           | id.t0      | begin tijd                                 | Hangt van voertuigvolgverdeling af                                                                |
| 6           | id.tend    | eindtijd                                   | als vtg van kruispunt weg is                                                                      |
| 7           | id.x0      | start positie x-richting                   | HS1: Hangt van voertuigvolgverdeling af<br>HS5: Hangt van voertuigvolgverdeling af                |
| 8           | id.y0      | start positie y-richting                   | HS1: -1,75<br>HS5: 1,75                                                                           |
| 9           | id.heading | Heading (richting/orientatie van voertuig) | In xyz coördinaten in radianen<br>stroom 1 rijdt in heading = 0<br>stroom 5 rijdt in heading = pi |
| 10          | id.vx0     | start snelheid x-richting                  | HS1: $13,89 \text{ ms}^{-1}$ (50 km/u)<br>HS5: $-13,89 \text{ ms}^{-1}$ (50 km/u)                 |
| 11          | id.vy0     | start snelheid y-richting                  | 0                                                                                                 |
| 12          | id.ax0     | start versnelling x-richting               | 0                                                                                                 |
| 13          | id.ay0     | start versnelling y-richting               | 0                                                                                                 |

### Advanced cruise control bestand

In tabel C-6 In dit bestand staan de instellingen voor het voertuigvolgmodel. Gekoppeld door de eerste kolom id.track aan het trackbestand.

Tabel C-6 Hoofdstroom advanced cruise control bestand (.acc)

| kolomnummer | kolomnaam   | omschrijving                                  | waarde                            |
|-------------|-------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1           | id.track    | nummer van het voertuig.                      | voertuignummer                    |
| 2           | timeheaddes | Time-headway desired                          | 0,4                               |
| 3           | S0          | Minimale gewenste afstand tot voorafgaand vtg | 3 meter                           |
| 4           | vcr         | Gewenste kruissnelheid                        | $13,89 \text{ ms}^{-1}$ (50 km/u) |

## Bijlage D Uitvoer van het simulatiemodel

In deze bijlage staat beschreven welke variabelen zijn gelogd in de uitvoer van het simulatiemodel. De uitvoer is opgedeeld in vijf onderdelen, zie tabel D-1. De eerste drie onderdelen worden elk beslissingsmoment gelogd. Het eerste onderdeel bestaat uit het tijdstip in de simulatie wanneer de logging is opgeslagen. De gap acceptance parameters van de invoegende bestuurder is het tweede onderdeel. Deze zijn direct overgenomen van het invoerbestand 'gap acceptance model'. Het derde onderdeel bestaat uit tussenvariabelen, waarin de scores van de hiaten worden bepaald. Het vierde onderdeel wordt gelogd bij een besluit om een hiaat te accepteren en de manoeuvre te starten. Hierin is onder andere de lengte van het gekozen hiaat en de versnelling weergegeven. Aan het eind van de manoeuvre is de logging van het laatste onderdeel. Hierin staan de afgeleide veiligheidsindicatoren, de maximale afremming van het hoofdstroomvoertuig en de wachttijd van de bestuurder.

Tabel D-1 Uitvoer variabelen van het simulatie model

| Soort variabele                                                    | Naam Variabele    | Omschrijving                                   | nummer |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|--------|
|                                                                    | Timestamp         |                                                | 1      |
| Invoervariabelen bestuurder<br>(rechtstreeks uit<br>invoerbestand) | Track ID          |                                                | 2      |
|                                                                    | maxView           |                                                | 3      |
|                                                                    | gender            |                                                | 4      |
|                                                                    | age               |                                                | 5      |
|                                                                    | TGapCritical      |                                                | 6      |
|                                                                    | acceptFirstFactor |                                                | 7      |
|                                                                    | correctionFactor1 |                                                | 8      |
|                                                                    | correctionFactor2 |                                                | 9      |
|                                                                    | correctionFactor3 |                                                | 10     |
|                                                                    | correctionFactor4 |                                                | 11     |
|                                                                    | correctionFactor5 |                                                | 12     |
|                                                                    | aMax              |                                                | 13     |
|                                                                    | aNormal           |                                                | 14     |
|                                                                    | tGapNormal        |                                                | 15     |
| Tussenvariabelen 1 (elke<br>beslissingstap)                        | gapscore1         | Score van hiaat 1                              | 16     |
|                                                                    | gapscore2         | Score van hiaat 2                              | 17     |
|                                                                    | gapscore3         | Score van hiaat 3                              | 18     |
|                                                                    | gapscore4         | Score van hiaat 4                              | 19     |
|                                                                    | gapscore5         | Score van hiaat 5                              | 20     |
|                                                                    | gapNumber         | Hiaat met maximale score                       | 21     |
|                                                                    | acceptFirstGap    | 0= hiaat wordt niet gekozen                    | 22     |
| Tussenvariabelen 2 (als<br>eerste hiaat is geaccepteerd)           | tFirstGap         | Lengte van eerste hiaat                        | 23     |
|                                                                    | acceleration      | Versnelling bij start manoeuvre                | 24     |
| Eindvariabelen (na de<br>manoeuvre)                                | PET               | PET-waarde                                     | 25     |
|                                                                    | maxDecHS5         | Maximale deceleratie van opkomend voertuig HS5 | 26     |
|                                                                    | minimalTTC        | Minimale TTC-waarde                            | 27     |
|                                                                    | maxdecHS1         | Maximale deceleratie van opkomend voertuig HS1 | 28     |
|                                                                    | waitingTime       | Totale wachttijd van bestuurder                | 29     |

## Bijlage E Berekening van de afgeleide veiligheidsindicatoren

---

Deze bijlage behandelt de berekening van de afgeleide veiligheidsindicatoren en de wachttijd per manoeuvre. De bepaling van de maximale deceleratie is voor testdoeleinde gelogd en is als derde beschreven in deze bijlage.

### **E.1 Berekening Time-to-collision**

De time-to-collision (TTC) wordt alleen bepaald tussen het nevenstroomvoertuig en het opkomende voertuig in de hoofdstroom van rechts. De minimale TTC-waarde die optreedt, is opgeslagen.

Voor de TTC is het noodzakelijk dat er een botskoers aanwezig is tussen de twee voertuigen. De TTC wordt elke simulatiestap berekend door het afstandsverschil te delen door het snelheidsverschil van twee voertuigen, zie formule (E-1) (Minderhoud en Bovy, 2001).

$$TTC = \frac{x_{ns} - l_{ns} - x_{hs}}{v_{hs} - v_{ns}} \quad \text{waarbij } v_{hs} > v_{ns} \quad (E-1)$$

Met:

$x_{ns}$  = positie nevenstroomvoertuig

$x_{hs}$  = positie hoofdstroomvoertuig

$l_{ns}$  = lengte nevenstroomvoertuig

$v_{ns}$  = snelheid nevenstroomvoertuig

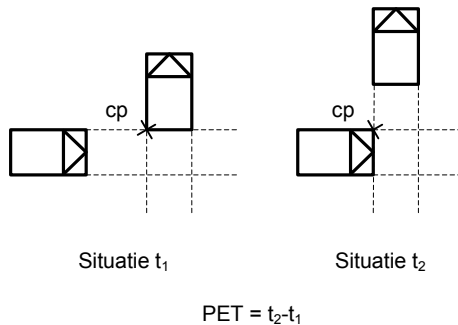
$v_{hs}$  = snelheid hoofdstroomvoertuig.

De berekening van de TTC start op het moment dat het nevenstroomvoertuig in de rijbaan van het hoofdstroomvoertuig rijdt. Dit is de start van de conflictlijn. De conflictlijn is de lijn waarop het conflict kan voorkomen (Gettman en Head, 2003).

Elke tijdstap wordt de TTC berekend volgens formule (E-1), tot het eind van de conflictlijn op 100 meter van de kruising. De minimale TTC-waarde wordt opgeslagen en uitgevoerd in het logbestand.

## E.2 Berekening Post-encroachment-time

De post-encroachment-time (PET) is gedefinieerd als de tijd die verstrijkt tussen het moment dat het eerste voertuig het pad van het tweede voertuig verlaat en het moment dat het tweede voertuig het pad van het eerste voertuig bereikt (Van der Horst, 1990), zie figuur E-1. De PET-waarde wordt alleen berekend tussen het nevenstroomvoertuig en het opkomende voertuig in de hoofdstroom van links.



Figuur E-1 Post encroachment-time (Van der Horst, 1990)

Er zijn drie grootheden noodzakelijk voor de PET:

Coördinaten van het conflictpunt.

Tijdstip achterkant voertuig nevenstroom over conflictpunt

Tijdstip voorkant voertuig hoofdstroom over conflictpunt

Het conflictpunt is het laatste gemeenschappelijke punt van twee voertuigpaden.

Er is geen laterale beweging in het voertuigvolgmodel op de hoofdstromen, daarmee ligt het pad van het hoofdstroomvoertuig van links vast. Hieruit kan de y-coördinaat van het conflictpunt worden gehaald. Bij een voertuigbreedte van 1,8 meter, een rijbaanbreedte van 3,5 meter en een plaatsing van het voertuig in het midden van de rijbaan is de y-coördinaat van het conflictpunt 0,85.

De x-coördinaat hangt af van het pad van het nevenstroomvoertuig in de bocht. De x-coördinaat wordt in deze simulatie gedefinieerd als de locatie waar de linkerachterbumper voorbij de y-coördinaat 0,85 komt.

Daarmee zijn de coördinaten van het conflictpunt als volgt gedefinieerd:

y-coördinaat = 0,85

x-coördinaat = uit pad en bocht van nevenstroomvoertuig, bij het y-coördinaat van 0,85.

Met dit conflictpunt kan de PET worden berekend:

PET = Tijdstip achterkant nevenstroomvoertuig over conflictpunt- Tijdstip voorkant hoofdstroomvoertuig van links over conflictpunt.

### ***E.3 Berekening maximale deceleratie hoofdstroomvoertuig***

Voor testdoeleinden is de maximale deceleratie gelogd van het opkomende voertuig op de hoofdstroom bij zowel de TTC als de PET. Vanaf het moment dat het hoofdstroomvoertuig moet remmen voor het invoegende nevenstroomvoertuig is de deceleratie gemonitord. De maximale deceleratie gedurende de hele manoeuvre is gelogd. Op deze wijze is er een beeld gekregen van de reactie van het hoofdstroomvoertuig. Als er in vervolgonderzoek met meerdere snelheden op de hoofdstroom wordt gewerkt, geeft deze extra veiligheidsindicator een beeld van de ernst van het conflict als het tot een ongeval zou hebben geleid. De deceleratie moet dan berekend worden als de gemiddelde deceleratie gedurende de tijd die er afgeremd wordt. Dit geeft een beter beeld dan de maximale deceleratie. De maximale deceleratie kan namelijk in het voertuigvolgmodel heel hevig maar heel kort zijn. Dit kan voortvloeien uit de algoritmes uit het voertuigvolgmodel.

## Bijlage F Statistische toetsing

In deze bijlage worden de wachttijden van de experimenten statistisch getoetst. In de eerste paragraaf wordt de totale wachttijd onderzocht. In de tweede paragraaf wordt een opsplitsing gemaakt naar kritiek hiaat.

Uit de simulaties komen conflicten en wachttijden. Conflicten zijn zo klein in aantal dat er geen statistische analyse wordt gedaan.

De wachttijd is beschikbaar van elke nevenstroombestuurder in elk experiment. Een statistische analyse of de wachttijden verschillen kan wel worden gemaakt. De gemiddelde wachttijd per nevenstroombestuurder per experiment staat in tabel F-1:

*Tabel F-1 Gemiddelde wachttijd per nevenstroombestuurder per experiment*

| Experimentnaam     | Weegfactoren     | Gemiddelde wachttijd(s) |
|--------------------|------------------|-------------------------|
| Experiment 1       | 1,0,0,0          | 31,4                    |
| Experiment 2       | 1,0.75,0,0       | 30,7*                   |
| Experiment 4-(0,5) | 1,0.5,0.25,0.125 | 31,0*                   |
| Experiment 4       | 1,0.75,0.5,0.25  | 31,6                    |

De waarden liggen erg dichtbij elkaar, maar verschillen iets. Is er een significant verschil of kan men zeggen dat statistisch gezien de uitkomsten van de experimenten gelijk zijn?

Elk experiment bestaat uit 350 waarnemingen. Deze 350 waarnemingen zijn gepaard, omdat in elk experiment dezelfde bestuurders en verkeersstromen zijn gesimuleerd. Het doel van de toetsing is het verschil in wachttijd van experiment 2,4-(0,5) en 4 ten opzichte van experiment 1 bepalen.

Zowel de wachttijden als de verschillen tussen experiment 1 en de drie andere experimenten zijn niet normaal verdeeld. Er moet gebruik worden gemaakt van een parametervrije toets met gepaarde waarnemingen. Onder een paar wordt de wachttijd verstaan van 2 experimenten die gedraaid zijn met dezelfde instellingen.

De Wilcoxon-Signed Rank test wordt gebruikt. In deze toets wordt per gepaarde waarneming het verschil bepaald. Op basis van de verschillen worden rangnummers toegekend. Het kleinste verschil krijgt een laag rangnummer, het grootste verschil een hoog rangnummer onafhankelijk van het teken van het verschil. Dan wordt het teken van het verschil, positief of negatief toegekend aan het rangnummer. Er wordt getest of de som van de rangen van de positieve verschillen groter is dan de som van de rangen van de negatieve verschillen. Als paren dezelfde waarde hebben worden deze niet meegenomen in de toetsing. De toets geeft meer gewicht aan een paar dat een groot verschil aangeeft dan een klein verschil (Siegel en Castellan, 1988).



De nul hypothese H0 luidt dat er geen verschil is tussen de experimenten. Er wordt tweezijdig getoetst.

De toets wordt uitgevoerd met een onbetrouwbaarheidsdrempel van  $\alpha=0,05$ . Bij een p-waarde kleiner dan 0,05 moet H0 worden verworpen. Wat in dit geval betekent dat er statistisch gezien geen aanleiding is om aan te nemen dat de waarden uit de experimenten gelijk zijn.

Resultaten zijn verkregen met behulp van het programma SPSS en gepresenteerd in tabel F-2.

Tabel F-2 Toetsing experimenten

|                                 | wTimeExp2 -<br>wTimeExp1 | wTimeExp45 -<br>wTimeExp1 | wTimeExp4 -<br>wTimeExp1 |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Negative ranks                  | 110                      | 110                       | 103                      |
| Positive ranks                  | 28                       | 34                        | 51                       |
| Ties                            | 212                      | 206                       | 196                      |
| Z                               | -3,558(a)                | -2,472(a)                 | -,219(b)                 |
| Asymp. Sig. (2-tailed) P-waarde | ,000                     | ,013                      | ,826                     |
| Resultaat toetsing              | H0 verwerpen             | H0 verwerpen              | H0 accepteren            |

a Based on positive ranks.

b Based on negative ranks.

Er kan worden geconcludeerd dat er statistisch bewijs is dat de wachttijden in experiment 2 verschillend zijn aan die van experiment 1 en dat de wachttijden in experiment 4-(0,5) verschillend zijn aan die van experiment 1. Er is statistisch bewijs dat de wachttijden in experiment 4 gelijk zijn aan die van experiment 1.

Een opsplitsing naar kritiek hiaat is gemaakt om te kijken of er verschillen zijn in wachttijd als een splitsing wordt gemaakt in de bestuurders. Nu wordt getracht om verschillen tussen de experimenten binnen de kritieke hiaten aan te tonen. De sample size per kritiek hiaat is 50. De Wilcoxon signed rank test wordt toegepast om de verschillen in wachttijd per kritiek hiaat te achterhalen. De onbetrouwbaarheidsdrempel is  $\alpha=0,05$  en er is tweezijdig getoetst. De resultaten zijn gegeven in tabel F-3, F-4 en F-5.

Tabel F-3 Toetsing Experiment 1 en 2

|                                 | exp2_3 -<br>exp1_3 | exp2_3.8 -<br>exp1_3.8 | exp2_4.7 -<br>exp1_4.7 | exp2_5.5 -<br>exp1_5.5 | exp2_6.4 -<br>exp1_6.4 | exp2_7.2 -<br>exp1_7.2 | exp2_8.1 -<br>exp1_8.1 |
|---------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Negative ranks                  | 11                 | 17                     | 13                     | 15                     | 18                     | 17                     | 19                     |
| Positive ranks                  | 10                 | 5                      | 5                      | 2                      | 3                      | 2                      | 1                      |
| Ties                            | 29                 | 28                     | 32                     | 33                     | 29                     | 31                     | 30                     |
| Z                               | -1,374(a)          | -1,513(b)              | -,240(b)               | -2,255(b)              | -2,245(b)              | -2,578(b)              | -3,215(b)              |
| Asymp. Sig. (2-tailed) P-waarde | ,169               | ,130                   | ,810                   | ,024                   | ,025                   | ,010                   | ,001                   |

a Based on negative ranks.

b Based on positive ranks.

Tabel F-4 Toetsing Experiment 1 en 4-(0,5)

|                                 | exp45_3 - exp1_3 | exp45_3.8 - exp1_3.8 | exp45_4.7 - exp1_4.7 | exp45_5.5 - exp1_5.5 | exp45_6.4 - exp1_6.4 | exp45_7.2 - exp1_7.2 | exp45_8.1 - exp1_8.1 |
|---------------------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Negative ranks                  | 12               | 17                   | 12                   | 15                   | 19                   | 16                   | 19                   |
| Positive ranks                  | 10               | 7                    | 5                    | 5                    | 3                    | 3                    | 1                    |
| Ties                            | 28               | 26                   | 33                   | 30                   | 28                   | 31                   | 30                   |
| Z                               | -1,300(a)        | -,429(b)             | -,071(b)             | -,935(b)             | -2,358(b)            | -1,894(b)            | -3,215(b)            |
| Asymp. Sig. (2-tailed) P-waarde | ,194             | ,668                 | ,943                 | ,350                 | ,018                 | ,058                 | ,001*                |

a Based on negative ranks.

b Based on positive ranks.

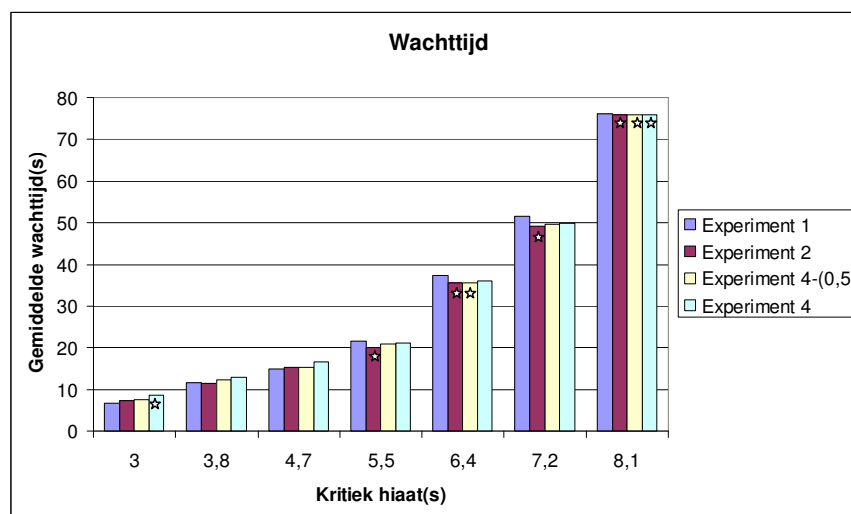
Tabel F-5 Toetsing Experiment 1 en 4

|                                 | exp4_3 - exp1_3 | exp4_3.8 - exp1_3.8 | exp4_4.7 - exp1_4.7 | exp4_5.5 - exp1_5.5 | exp4_6.4 - exp1_6.4 | exp4_7.2 - exp1_7.2 | exp4_8.1 - exp1_8.1 |
|---------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Negative Ranks                  | 9               | 15                  | 12                  | 15                  | 17                  | 16                  | 19                  |
| Positive Ranks                  | 16              | 9                   | 9                   | 6                   | 6                   | 4                   | 1                   |
| Ties                            | 25              | 26                  | 29                  | 29                  | 27                  | 30                  | 30                  |
| Z                               | -2,827(a)       | -,572(a)            | -1,305(a)           | -,574(b)            | -1,005(b)           | -1,458(b)           | -3,215(b)           |
| Asymp. Sig. (2-tailed) P-waarde | ,005            | ,567                | ,192                | ,566                | ,315                | ,145                | ,001                |

a Based on negative ranks.

b Based on positive ranks.

In figuur F-1 zijn de wachttijden die significant verschillen weergegeven met een sterretje.



Figuur F-1 Wachttijden naar kritiek hiaat en experiment

De toets geeft een opmerkelijk resultaat bij kritiek hiaat 8,1 seconde. Er is een miniem verschil in gemiddelde wachttijd tussen experiment 1 en de andere drie experimenten. Uit de toetsing blijkt dat het verschil wel statistisch significant is. Dit kan te maken hebben met het feit dat er maar 1 verschillscore positief is en er 19 negatief. Van de 19 zijn er 18 kleine verschillen. Als er maar 1 verschillscore positief is, dan is de kans erg groot dat de som van de rangnummers van de positieve verschillscores verschillend is van de som van de negatieve rangnummers.

De toets lijkt hiermee niet goed toepasbaar op de data van kritiek hiaat 8,1 seconden. Een andere toets kan echter niet gebruikt worden.