

Effecten van een robuust wegennet op het fietsverkeer

Dr. ir. A. Dijkstra

R-2012-3

Effecten van een robuust wegennet op het fietsverkeer

Resultaten uit een microsimulatiemodel

Documentbeschrijving

Rapportnummer:	R-2012-3
Titel:	Effecten van een robuust wegennet op het fietsverkeer
Ondertitel:	Resultaten uit een microsimulatiemodel
Auteur(s):	Dr. ir. A. Dijkstra
Projectleider:	Dr. ir. A. Dijkstra
Projectnummer SWOV:	C09.06
Trefwoord(en):	Road network; traffic flow; congestion; traffic; safety; cycling; cyclist; driving (veh); simulation; mathematical model; forecast; junction; cross roads; Netherlands; SWOV.
Projectinhoud:	De visie 'Robuust wegennet' van de ANWB wil een antwoord vormen op de toenemende kwetsbaarheid van het huidige wegennet voor verstoringen in de doorstroming. In een pilotstudie is voor een specifieke situatie gekeken naar de verkeersveiligheidseffecten van een dergelijk wegennet. Die pilotstudie gaf echter nog geen antwoord op de vraag welke gevolgen het fietsverkeer van een robuust wegennet zal ondervinden. De onderhavige studie is specifiek gericht op de effecten van een robuust wegennet op fietsverkeer in interactie met motorvoertuigen.
Aantal pagina's:	24 + 10
Prijs:	€ 10,-
Uitgave:	SWOV, Leidschendam, 2012

De informatie in deze publicatie is openbaar.
Overname is echter alleen toegestaan met bronvermelding.

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV
Postbus 1090
2260 BB Leidschendam
Telefoon 070 317 33 33
Telefax 070 320 12 61
E-mail info@swov.nl
Internet www.swov.nl

Samenvatting

De doorstroming op het Nederlandse hoofdwegennet is problematisch door een intensief gebruik en een nagenoeg gelijkblijvende capaciteit. Daardoor blijft de bereikbaarheid van de economische centra onder zware druk staan. In 2008 heeft de ANWB zijn visie op het wegennet openbaar gemaakt. Deze visie Robuust wegennet wil het antwoord vormen op de toenemende kwetsbaarheid van het huidige wegennet voor verstoringen in de doorstroming. De SWOV heeft in samenwerking met de ANWB een pilotstudie uitgevoerd om de veiligheidseffecten van een robuust wegennet na te gaan. In die verkennende studie zijn betrekkelijk geringe verschillen gevonden tussen de visie Duurzaam Veilig en de visie Robuust wegennet, zowel voor de doorstroming als voor de verkeersveiligheid. Het lijkt mogelijk om beide visies te integreren tot een systeem dat meer doorstroming biedt en tegelijkertijd optimaal veilig is.

De pilotstudie gaf nog geen antwoord op de vraag welke gevolgen het fietsverkeer van een robuust wegennet zal ondervinden. Toch zal op een robuust wegennet het doorgaande autoverkeer (incidenteel) meer gebruikmaken van het onderliggend wegennet en daar met het fietsverkeer interfereren. In dit rapport is daarom voor zowel gemotoriseerd verkeer als fietsverkeer geprobeerd een antwoord te vinden op de volgende vragen:

1. Welke gevolgen voor de verkeersveiligheid zijn te verwachten bij de introductie van robuuste wegennetten?
2. Zijn deze gevolgen te kwantificeren?
3. Welke maatregelen zijn geschikt om eventuele nadelige gevolgen te ondervangen?

Het effect van een robuust wegennet op het fietsverkeer is onderzocht met het microsimulatiemodel S-Paramics. Met dat model is een wegennet gesimuleerd waarop een deel van het autoverkeer gebruik is gaan maken van onderliggende wegen, na een incident op het hoofdwegennet. Op een van de onderliggende wegen is een kruisend fietspad gesimuleerd. Dit geeft een indruk van de hinder (doorstroming, veiligheid) die fietsverkeer op kruispunten kan ondervinden als autoverkeer uitwijkt naar onderliggende wegen. Het microsimulatiemodel biedt (nog) niet de mogelijkheid om hinder te simuleren die fietsers op wegvakken ondervinden.

In deze studie is vastgesteld dat de effecten op de doorstroming het grootst zijn op een kruispunt met voorrang voor het autoverkeer. Op zo'n kruispunttype stroomt het fietsverkeer niet meer goed door wanneer het autoverkeer uitwijkt naar de onderliggende wegen. Voor de verkeersveiligheid vertoont dit kruispunttype geen nadelige effecten.

Nadelige veiligheidseffecten treden wel op bij een kruispunt met voorrang voor fietsers. Dat kruispunttype laat de fietsers wel goed doorstromen ondanks de toename van het autoverkeer (door het incident op de snelweg). Het kruispunt met VRI is voor fiets en auto geschikt voor zowel doorstroming als veiligheid. Overigens geeft dit simulatiemodel een onderschatting van de onveiligheid op dit kruispunttype, doordat men in het model niet door rood rijdt, terwijl dat in werkelijkheid wel het geval zal zijn.

Summary

Effects of a robust roads network on bicycle traffic; Results obtained from a microsimulation model

The traffic flow on the Dutch main road network is problematic due to intensive use and near stagnant capacity. As a result the accessibility of the economic centres is still under heavy pressure. In 2008, the Royal Dutch Touring Club ANWB made public its vision on the road network. This vision, known as the Robust roads network is intended to be the answer to the increasing vulnerability of the present road network for disturbances of the traffic flow. SWOV, together with ANWB, carried out a pilot study into the safety effects of a robust roads network. This pilot study found relatively small differences between the Sustainable Safety vision and the Robust roads network, for both traffic flow and road safety. It seems feasible to integrate the two visions into a system that offers a larger traffic flow and at the same time provides optimal safety.

The pilot study did not yet answer the question of which effects a robust roads network would have on bicycle traffic. At the same time, however, motorized through traffic will (incidentally) make more use of the secondary roads network and at those locations interfere with bicycle traffic. The present report, therefore, has attempted to find answers to the following questions:

1. Which effects on road safety are to be expected when robust roads networks are introduced?
2. Can these effects be quantified?
3. Which measures can be taken to prevent possible adverse consequences?

The effects of a robust roads network on bicycle traffic has been investigated with the microsimulation model S-Paramics. In this model a road network was simulated in which part of the car traffic made use of the secondary roads after an incident had occurred on the main roads network. An intersecting bicycle path was simulated at one of the secondary roads. This gives an impression of the hindrance (flow, safety) that bicycle traffic can experience at intersections when the car traffic uses the secondary roads as an alternative. The microsimulation model does not (yet) have the possibility of simulating the hindrance cyclists may experience at road sections.

The present study has established that the greatest effects on traffic flow may be observed at intersections with priority for car traffic. At this type of intersection, bicycle traffic flow is obstructed when car traffic uses secondary roads as an alternative. There are no adverse road safety effects at this intersection type.

Adverse safety effects do indeed occur at intersections with priority for cyclists. This type of intersection enables good traffic flow for cyclists despite the increase in car traffic (due to the incident on the motorway).

The intersection with traffic light control achieves good flow as well as safety for both bicycle and car. It must be noted, however, that the simulation model underestimates the dangers at this intersection type, as, other than in reality, the model does not allow for going through a red light.

Inhoud

1.	Inleiding	7
2.	Wat is een robuust wegennet	8
3.	Bepaling van effecten van een robuust wegennet op het fietsverkeer	10
3.1.	Verwachte effecten	10
3.2.	Hoe zijn de effecten onderzocht?	10
3.3.	Gemodelleerd wegennet in <i>S-Paramics</i>	13
4.	Onderzoeksresultaten	15
4.1.	Voorrangskruispunt voor de auto	15
4.2.	Voorrangskruispunt voor de fiets	17
4.3.	Kruispunt met VRI	19
4.4.	Onderlinge vergelijking van kruispunttypen	20
4.4.1.	Vergelijking kruispunttypen zonder incident	21
4.4.2.	Vergelijking kruispunttypen met incident	21
4.4.3.	Functioneren van het beschouwde hoofdwegennet tijdens een incident	21
5.	Conclusies en aanbevelingen	23
5.1.	Conclusies	23
5.2.	Aanbevelingen	23
	Literatuur	24
Bijlage	Conflictindicatoren (uit Dijkstra & Drolenga, 2006)	25

1. Inleiding

De doorstroming op het Nederlandse hoofdwegennet is problematisch door een intensief gebruik en een nagenoeg gelijkblijvende capaciteit. Daarmee is de bereikbaarheid van de economische centra onder zware druk komen te staan. In 2008 heeft de ANWB zijn visie op het wegennet openbaar gemaakt. Deze visie 'Robuust wegennet' wil het antwoord vormen op de toenemende kwetsbaarheid van het huidige wegennet voor verstoringen in de doorstroming. De ANWB wil hiermee een constructieve bijdrage leveren aan de discussie over een betere bereikbaarheid van ons land. Inmiddels spreekt de nota *Mobiliteitsaanpak* (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008) over het streven naar een robuust wegennet.

De visie Robuust wegennet zoals die is gepresenteerd bevat nog geen duidelijkheid omtrent de verkeersveiligheids- en milieueffecten. De SWOV heeft daarom in samenwerking met de ANWB een pilotstudie uitgevoerd om de veiligheidseffecten van een robuust wegennet na te gaan (Dijkstra & Tromp, 2010). In die verkennende studie zijn betrekkelijk geringe verschillen gevonden tussen de visie Duurzaam Veilig en de visie Robuust wegennet, zowel wat de doorstroming als de verkeersveiligheid betreft. Het lijkt mogelijk om beide visies te integreren tot een systeem dat meer doorstroming biedt en tegelijkertijd optimaal veilig is. De pilotstudie van Dijkstra & Tromp (2010) leidt nog niet tot algemene uitspraken over het verschil tussen een robuust en een duurzaam veilig wegennet. De pilotstudie betrof namelijk geen algemeen representatief verkeerskundig probleem, maar een specifieke situatie waarvoor specifieke oplossingen zijn aangedragen. De aard van de pilotstudie maakte het ook niet mogelijk om in te gaan op de positie van het fietsverkeer in een robuust wegennet.

De onderhavige studie is specifiek gericht op de effecten van een robuust wegennet op het fietsverkeer in interactie met motorvoertuigen. In dit rapport zijn alleen gevolgen van een 'robuust wegennet' voor het verkeer op de weg behandeld; eventuele gevolgen voor het gebruik van openbaar vervoer zijn niet meegenomen.

Voor zowel gemotoriseerd verkeer als voor fietsverkeer is geprobeerd een antwoord te vinden op de volgende onderzoeksvragen:

1. Welke gevolgen voor de verkeersveiligheid zijn te verwachten bij de introductie van robuuste wegennetten?
2. Zijn deze gevolgen te kwantificeren?
3. Welke maatregelen zijn geschikt om eventuele nadelige gevolgen te ondervangen?

2. Wat is een robuust wegennet

De visie Robuust wegennet is onderbouwd door TNO (Schrijver et al., 2008), in opdracht van de ANWB. TNO heeft eerder een sterk verwante benadering uitgebracht onder de titel *Bypasses voor bereikbaarheid* (Immers et al., 2001). In beide benaderingen staat de ontvlechting van langeafstandsverplaatsingen en regionale verplaatsingen centraal. In een robuust wegennet stroomt het verkeer op de hoofdwegen zo veel mogelijk door, onder andere door het verkeer op toegangspunten tijdelijk te bufferen. Robuust betekent volgens TNO 'functiebehoud onder wisselende omstandigheden': de stroomfunctie van de hoofdwegen moet zo veel mogelijk in stand blijven. Tijdens incidenten moet reservecapaciteit beschikbaar zijn. Dat is mogelijk door een opwaardering van onderliggende wegen en een herstructurering van knooppunten. Deze benadering gaat ervan uit dat het huidige stelsel van hoofdwegen niet meer verder kan worden verbeterd zonder er andere (stelsels van) wegen bij te betrekken. De meeste wegen in het huidige wegennet hebben een vaste capaciteit: bij bijzondere omstandigheden is het niet mogelijk om de capaciteit tijdelijk te verhogen. In een robuust wegennet zou dat juist wel mogelijk moeten zijn. Op wegvakken en kruispunten zijn er binnen deze visie verschillende soorten maatregelen mogelijk om dit te bereiken.

De capaciteit

De capaciteit van wegvakken hangt vooral af, zeker buiten de bebouwde kom, van het aantal rijstroken per richting. Op enkele autosnelwegen is al enkele jaren de *spitsstrook* een manier om gedurende de spitsuren extra capaciteit te leveren door de vluchtstrook als tijdelijke rijstrook open te stellen. Bij incidenten zal de wegbeheerder trachten zo snel mogelijk deze strook weer beschikbaar te stellen voor hulpdiensten.

Ook een *wisselstrook* kan extra capaciteit leveren. Dit is een rijstrook die beurtelings beschikbaar is voor de drukste richting. Soms is er voor de rijrichtingscheiding een verplaatsbare barrière aanwezig die via een speciaal voertuig in positie wordt gebracht.

Scheiding tussen doorgaand verkeer en uitvoegend en/of invoegend verkeer is mogelijk door *aparte rijbanen* voor dezelfde rijrichting aan te leggen. Op een parallelbaan geldt meestal een lagere snelheidslimiet dan op de rijbaan voor doorgaand verkeer.

Kruispunten en opritten

Kruispunten bepalen in het stedelijk gebied de capaciteit van het wegennet. *Tabel 2.1* geeft een overzicht van de capaciteit van enkele kruispunttypen. *Tabel 2.1* zijn aantallen motorvoertuigen per uur gegeven. Fietsers tellen in dergelijke capaciteitscijfers mee voor 0,3 motorvoertuig.

Via een *bypass* vergroot men permanent de capaciteit van een specifieke richting (meestal een rechts afslaan richting). Een *ongelijkvloerse* uitvoering van een bypass (meestal voor het rechtdoor gaande verkeer op de hoofdstroom) geeft eveneens een aanzienlijke verhoging van de capaciteit.

Om kruispunten tijdelijk extra capaciteit te laten bieden, zijn in het geval van een verkeerslichtenregeling faciliteiten in te bouwen die de VRI-regeling aanpast aan de *actuele 'vraag'* vanuit de verschillende richtingen.

Bij opritten wordt voorgesteld zogeheten *buffers* aan te leggen. Bij een buffer wachten voertuigen enige tijd totdat er ruimte beschikbaar is op de autosnelweg. Een buffer bestaat uit een aantal naast elkaar gelegen rijstroken die ten minste enkele tientallen meters lang zijn.

	Capaciteit in een spitsuur van alle vier toeritten tezamen (in mvt per uur)	Maximale capaciteit van een tak (in de richting van het kruispunt of de rotonde)
Kruispunt met voorrangregeling	1.500	1.100
Kruispunt met VRI, drie rijstroken per toevoertak	3.500	3.800
Enkelstrooksrotonde	2.000	1.100 - 1.500
Turborotonde, basisvorm	3.500	1.900 - 2.100

Tabel 2.1. *Praktische capaciteit van enkele kruispunttypen met vier takken (CROW, 2008).*

Fietsverkeer

Door de werking van een robuust vormgegeven wegennet zal (incidenteel) meer doorgaand autoverkeer gebruik gaan maken van het onderliggend wegennet. Dit autoverkeer zal dan gaan interfereren met fietsverkeer op die wegen. Fiets- en autoverkeer zal elkaar vaker kruisen en, op sommige wegvakken, ook vaker passeren. Het is denkbaar dat daardoor (negatieve) effecten voor de doorstroming en veiligheid van het fietsverkeer optreden. De voorgaande karakteristieken van een robuust wegennet geven echter geen indicaties over de manier waarop fietsverkeer moet worden gefaciliteerd of waarop fietsvoorzieningen moeten worden vormgegeven om negatieve gevolgen van die interferentie tegen te gaan.

3. Bepaling van effecten van een robuust wegennet op het fietsverkeer

Door de werking van het robuuste wegennet gaat autoverkeer gebruikmaken van wegen waarop of waarlangs fietsers rijden en/of van wegen die door fietsers worden gekruist. *Paragraaf 3.1* beschrijft de effecten die mogen worden verwacht op het fietsverkeer ten gevolge van deze verandering in autoverkeersstromen. In *Paragraaf 3.2* volgt een uiteenzetting van de manier waarop deze effecten zijn onderzocht. Ten slotte geeft *Paragraaf 3.3* een beschrijving van het gemodelleerde wegennet.

3.1. Verwachte effecten

De optredende effecten zijn in de simulatie verdeeld in effecten op kruispunten en effecten op wegvakken. De effecten voor het fietsverkeer betreffen wachttijden en verkeersveiligheid. De verkeersveiligheidseffecten zijn onderscheiden naar omvang en ernst. Zowel omvang als ernst is toegespitst op de 'ontmoetingen' tussen een fiets en een motorvoertuig. De ontmoetingen waarbij beide partijen elkaar dicht naderen, worden conflicten genoemd. De verkeersveiligheidseffecten zijn in dit rapport in termen van conflicten omschreven.

Kruispunten

Het onderliggend wegennet omvat verschillende kruispunttypen, zoals kruispunten met verkeerslichten, voorrangskruispunten en rotondes. Op elk type zijn andere effecten te verwachten, mede afhankelijk van de manier waarop de voorzieningen voor fietsverkeer op deze kruispunten zijn ingepast.

In het algemeen zal bij alle kruispunttypen een langere wachttijd voor fietsers ontstaan als het autoverkeer in omvang toeneemt. Door het groter aantal motorvoertuigen zullen fietsers en automobilisten elkaar vaker gaan ontmoeten. Dit geldt voor alle conflicttypen. Bij voorbaat is niet te stellen dat die conflicten ernstiger zullen worden, omdat de onderlinge snelheidsverschillen gelijk kunnen blijven.

Voor fietsers hebben dwarsconflicten een ernstiger afloop dan langsconflicten (SWOV, 2010). Als de verhouding in frequentie tussen deze conflicten verandert, dan zal de totale ernstgraad ook veranderen.

Wegvakken

Op wegvakken van het onderliggend wegennet zijn op de belangrijkste wegen vaak fietspaden aanwezig. In dat geval zullen langsconflicten niet aan de orde zijn. Op wegen waar fietspaden ontbreken, zal het aantal langsconflicten toenemen. Deze conflicten zullen ernstiger worden bij grotere snelheidsverschillen. Vooraf is niet met zekerheid te zeggen of grotere snelheidsverschillen daadwerkelijk zullen optreden.

3.2. Hoe zijn de effecten onderzocht?

De effecten op het fietsverkeer kunnen op verschillende manieren worden onderzocht. Het gaat hier om nog niet bestaande situaties, want een robuust wegennet bestaat nog niet. Dat sluit de uitvoering van een ongevalstudie

uit. Voor de studie naar toekomstige situaties zijn modelstudies gebruikelijk. Hiervoor zijn verschillende soorten modellen beschikbaar. Dijkstra & Drolenga (2006) laten zien dat met microsimulatiemodellen een evaluatie mogelijk is van zowel effecten op de verkeersafwikkeling als effecten op de verkeersveiligheid.

Microsimulatiemodellen

Wismans (2003) laat zien dat er vijf microsimulatiemodellen geschikt zijn voor het evalueren van de hiervoor genoemde effecten. Van deze modellen is om pragmatische redenen (zoals beschikbaarheid, ondersteuning en kosten) S-Paramics gekozen voor het SWOV-onderzoek (Dijkstra & Drolenga, 2006).

Een belangrijke reden om voor een microsimulatiemodel te kiezen, betreft de mogelijkheid om voertuigafhankelijke veiligheidsindicatoren te produceren (zie de *Bijlage* voor details). Deze indicatoren houden rekening met de actuele verkeerssituatie in het netwerk. Ze geven een kwantitatief inzicht in de mate waarin voertuigen andere voertuigen ontmoeten en hoe die ontmoeting verloopt; het zijn 'conflictmaten'. De aard van de voertuigen (massa), hun richting, snelheid, en positie in het dwarsprofiel bepalen in belangrijke mate de ernst van de conflicten. Overigens is hier steeds sprake van berekende conflicten in een simulatiemodel, dus geen werkelijke conflicten, laat staan (bijna-)ongevallen.

Bij de bepaling van wat een conflict is, speelt de Time-To-Collision (*TTC*) een belangrijke rol. De *TTC* is de tijd die resteert totdat twee conflicterende voertuigen gaan botsen, aannemende dat geen van beide voertuigen nog een vermijdende actie zal gaan ondernemen. De *TTC* neemt af naarmate de voertuigen elkaar dichter naderen. Zodra een vermijdende actie plaatsvindt, neemt de *TTC* weer toe. Voor de berekening van conflicten is de kritieke waarde van de *TTC* van belang. Gegeven de kritieke waarde tellen alleen de conflicten mee die een *TTC* hebben gelijk of onder die waarde. Dijkstra & Drolenga (2006) laten zien dat men in het onderzoek naar conflicten meestal 2,5 s als kritieke waarde hanteert, maar dat ook wel eens lagere waarden (vanaf 1,5 s) gekozen worden.

S-Paramics levert per seconde de uitvoer van gegevens over posities van alle voertuigen in het model. De berekening van de veiligheidsindicatoren vindt niet plaats binnen het model S-Paramics. De uitgevoerde gegevens worden door een afzonderlijk algoritme omgezet in veiligheidsindicatoren, zoals de *TTC*-waarden en het aantal conflicten.

Dijkstra (2010) laat zien dat deze berekende conflicten een kwantitatieve relatie hebben met het aantal ongevallen. Het aantal conflicten geeft daardoor een indicatie van het aantal te verwachten ongevallen.

Met het simulatiemodel worden nog drie andere conflictindicatoren berekend (Dijkstra & Drolenga, 2006). Dit zijn indicatoren die respectievelijk uitdrukking geven aan:

- de duur van een conflict - een langdurend conflict is ernstiger dan een kortdurend conflict (indicator *TEXT*);
- de combinatie van duur en ernst van een conflict - een kortdurend conflict waarbij de voertuigen elkaar zeer dicht naderen kan even ernstig zijn als een langer durend conflict waarbij de voertuigen elkaar minder dicht naderen (indicator *TInT*);

- de potentiële ernst van een conflict door de massaverschillen en richtingsverschillen van de betrokken voertuigen (indicator *PCE*).

Rijsnelheid en snelheidsverschil

In alle gehanteerde conflictindicatoren speelt de rijnsnelheid van beide conflicterende voertuigen een belangrijke rol. Zowel de verandering in de absolute hoogte van beide snelheden als de verandering in het snelheidsverschil, bepaalt de waarde van de indicatoren. Tevens is de veranderende afstand tussen beide voertuigen en de eventuele verandering in de rijrichtingen van belang bij de berekening. Zie de *Bijlage* voor details.

Simulatie van fietsverkeer

In de meeste microsimulatiemodellen, ook in S-Paramics, wordt fietsverkeer niet gemodelleerd. Het is wel mogelijk, maar er is veel extra inspanning nodig om fietsverkeer op een volwaardige manier in dergelijke modellen op te nemen. De eenvoudigste manier om fietsverkeer op een zinvolle manier te modelleren bestaat uit de toevoeging van kruispunten en oversteeklocaties waarop fietsers uitsluitend kruisen met het autoverkeer. Afslaan bewegingen komen hierbij niet voor. Op deze manier is de frequentie en de ernst van kruisende motorvoertuigen en fietsers (dwarsconflicten) te bepalen. In deze studie is zo te werk te gaan.

Door te variëren met kruispunttypen en met verkeerssituaties (met en zonder incident op het hoofdwegennet), kunnen de effecten voor fietsers (wat betreft wachttijd en veiligheid) worden bepaald.

Het is op dit moment nauwelijks mogelijk om met S-Paramics fietsverkeer op wegvakken te simuleren. Dat is daarom in dit rapport achterwege gelaten. Als een benadering voor de onveiligheid op wegvakken waarop de fietsers gebruikmaken van de rijbaan, kan de intensiteitstoename van het autoverkeer worden gekozen. In dit rapport is hier niet verder mee gewerkt. De aanname is dat alle (voor robuust wegennet) relevante onderliggende wegen zijn voorzien van fietspaden.

Gekozen kruispunttypen

In deze studie zijn drie kruispunttypen bestudeerd:

- voorrangskruispunt met voorrang voor de auto
- voorrangskruispunt met voorrang voor de fiets(oversteek)"
- kruispunt met verkeersregelinstallatie (VRI).

Het verkeer op deze kruispunten is gesimuleerd in gewone omstandigheden (met een normaal functionerend hoofdwegennet) en in een situatie met een incident op het hoofdwegennet waardoor autoverkeer uitwijkt naar het onderliggende wegennet.

Beperkingen

De berekening van conflicten op kruispunten met verkeerslichten heeft een beperking. In het simulatiemodel rijden voertuigen namelijk niet door het rode licht. Er is bij dit kruispunttype dus bij voorbaat een verschil tussen conflicten en ongevallen, want er ontstaan in werkelijkheid wel ongevallen vanwege 'door rood rijden' maar in het model ontstaan hierdoor geen conflicten. Dijkstra (2010) laat zien dat dit verschil vooral is te vinden tussen de dwarsconflicten in het model en de ongevallen van ditzelfde type. Voor deze beperking is nog geen oplossing gevonden. De berekening van conflicten op kruispunten met verkeerslichten levert daarom eigenlijk te weinig conflicten op. Dit nadeel is ondervangen door alleen situaties te vergelijken waarin de hoeveelheid verkeer op een kruispunt met VRI

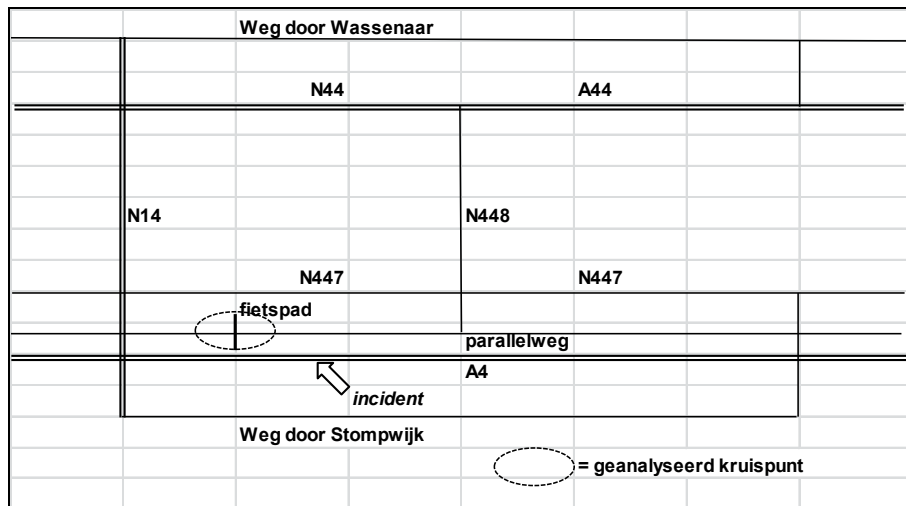
verandert ten gevolge van een incident op het hoofdwegenet. De absolute hoeveelheid conflicten is in dit geval niet relevant, alleen de relatieve verandering in het aantal conflicten is van belang om het effect van het incident te beoordelen.

Een tweede beperking zit besloten in de manier waarop voertuigen in het model voorrang verlenen. De voertuigen verlenen altijd correct voorrang volgens de voorgeschreven regeling. De enige 'ruimte' zit in de tijd die het model een voertuig geeft om naderende voertuigen voorrang te verlenen. Die tijd varieert per voertuig: het ene voertuig vertoont in het model daardoor 'riskanter' gedrag bij voorrang verlenen dan een ander.

3.3. Gemodelleerd wegennet in S-Paramics

Met het microsimulatieprogramma S-Paramics is een regionaal wegennet gebouwd met een structuur die qua opbouw lijkt op de wegenstructuur tussen Noordwijk, Katwijk, Leiden en Den Haag, namelijk vijf parallelle verbindingen en twee dwarsverbindingen (zie *Afbeelding 3.1*). Aan dit wegennet is een weg toegevoegd die parallel en vlak naast de A4 loopt. Deze weg moet een deel van het verkeer opvangen dat de A4 wil mijden bij incidenten. Deze weg wordt in dit rapport verder aangeduid als *parallelweg*. De N448 is verbonden met deze parallelweg. De snelheidslimiet op de parallelweg is 80 km/uur.

Verder is een fietspad aan het wegennet toegevoegd dat de parallelweg gelijkvloers kruist. Op dit kruispunt van fietspad en parallelweg zijn geen afslaan bewegingen toegestaan; in het model zijn dergelijke bewegingen uitgesloten. De conflicten tussen de kruisende voertuigen op dit kruispunt zijn beschreven in de volgende hoofdstukken.



Afbeelding 3.1. Gemodelleerd wegennet in S-Paramics.

Het betreffende kruispunttype is gevarieerd in drie uitvoeringen: voorrang voor de auto, voorrang voor de fiets en met VRI. Voor elk kruispunttype is een simulatie uitgevoerd met en zonder incident op de snelweg A4. In totaal ontstaan daardoor zes varianten.

Elke variant is tienmaal gesimuleerd gedurende een periode van twee uur. De uitkomsten daarvan verschilden iets, omdat elke simulatie eenzelfde aantal voertuigen op variërende momenten binnen de simulatieperiode liet vertrekken. Per variant zijn gemiddelde waarden berekend voor

voertuigintensiteiten en conflicten. Deze waarden zijn voor elk wegvak en kruispunt in dit wegennet berekend. Uit een eerdere studie (Dijkstra, 2010) is gebleken dat er in de tien simulaties slechts een kleine spreiding optreedt in de intensiteiten en aantallen conflicten.

Elke simulatie duurt twee uur. In die periode vindt na 50 minuten een incident plaats op de snelweg A4 in de richting van links naar rechts (*Afbeelding 3.1*). Het incident blokkeert de A4 gedurende een uur. In dat uur ontstaan lange wachtrijen op de A4. Een deel van het verkeer kan direct na vertrek uitwijken naar de parallelweg; een ander deel stelt het vertrek uit. Bij een langere simulatieduur zou dit uitgestelde vertrek weer worden opgevangen.

4. Onderzoeksresultaten

In dit hoofdstuk bespreken we de resultaten van de simulaties met het wegennet dat in *Paragraaf 3.3* is beschreven. De simulaties met een voorrangskruispunt voor de auto zijn in *Paragraaf 4.1* opgenomen, de simulaties met een voorrangskruispunt voor de fiets in *Paragraaf 4.2* en de simulaties met een VRI-kruispunt in *Paragraaf 4.3*. Elk van deze drie paragrafen geeft de vergelijking tussen simulaties met en zonder incident op het hoofdwegennet.

In *Paragraaf 4.4* zijn de drie kruispunttypen onderling vergeleken wat betreft verkeersafwikkeling en enkele veiligheidsindicatoren. Uit deze vergelijking volgt welk kruispunttype bij een incident de minst onwenselijke gevolgen oplevert voor het fietsverkeer.

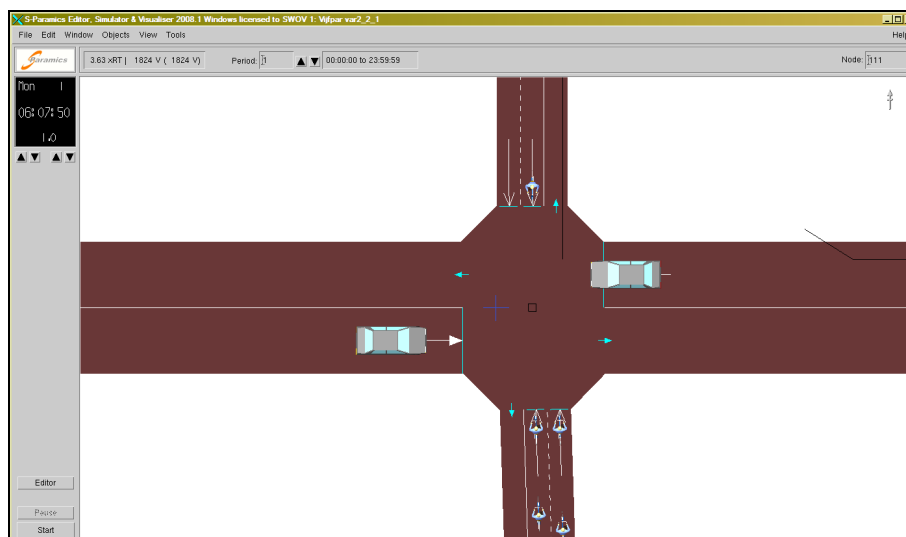
Alle uitgevoerde simulaties omvatten een periode van twee uur. In de besproken resultaten hierna zullen steeds de aantallen voertuigen en conflictindicatoren betrekking hebben op die periode. Er worden dus geen verkeersintensiteiten per uur genoemd.

De gekozen vertrekkende en aankomende aantallen voertuigen in het gesimuleerde wegennet zijn fictief. Er is wel gestreefd naar een aantal passerende voertuigen op het geanalyseerde kruispunt dat voldoende groot is om analyses met berekende conflicten mee uit te kunnen voeren.

Het gesimuleerde aantal passerende fietsers op het geanalyseerde kruispunt is fictief. Voor de capaciteit van een kruispunt wordt een fietser als 0,3 personenauto-equivalent (pae) gerekend. Dus bijvoorbeeld 100 passerende fietsers tellen als 30 personenauto's mee voor de benodigde capaciteit.

4.1. Voorrangskruispunt voor de auto

Op dit kruispunttype moet de fiets elke naderende auto voorrang verlenen. In de situatie met ongehinderde doorstroming op het hoofdwegennet, rijden ongeveer duizend fietsers per rijrichting over het kruispunt. Het aantal passerende motorvoertuigen bedraagt gemiddeld (over de tien simulaties) 480 van 'links naar rechts' in *Afbeelding 4.1*, en 1.307 van rechts naar links.



Afbeelding 4.1. Gemodelleerd voorrangskruispunt met voorrang voor de auto's op de parallelweg.

De incidenten op de snelweg A4 leiden tot meer autoverkeer op de parallelweg (Afbeelding 3.1). Het autoverkeer van links naar rechts stijgt van 480 naar 993 motorvoertuigen. In de andere richting neemt het toe van 1.307 naar 1.557. Deze toename belemmert het fietsverkeer. Er ontstaat een belemmering om over te steken. Het aantal fietsers in deze periode daalt per rijrichting van ongeveer duizend naar 826 fietsers. Het resterende deel van de fietsers zal in de navolgende periode moeten oversteken; die navolgende periode is niet gesimuleerd.

Veiligheidsindicatoren

In Paragraaf 3.2 is toegelicht dat er vier conflictindicatoren zijn berekend: aantal conflicten (*NOC*), *TExT*, *TInT* en *PCE*. Van deze indicatoren is ook een 'risicomaat' berekend door elke indicator te delen door het aantal passerende voertuigen (de som van auto en fiets en van alle richtingen) op het kruispunt. In Tabel 4.1 zijn deze indicatoren per simulatie (met en zonder incident) weergegeven voor twee conflicttypen: kop-staart- en dwarsconflicten. De kop-staartconflicten worden per tak bepaald tot 50 m vanaf het kruisingsvlak (in alle richtingen); de dwarsconflicten vinden alleen op het kruisingsvlak plaats.

	Met/ zonder incident	Passerende voertuigen (vrt)	<i>NOC</i>	<i>NOC/vrt</i>	<i>TExT</i>	<i>TExT/vrt</i>	<i>TInT</i>	<i>TInT/vrt</i>	<i>PCE</i>	<i>PCE/vrt</i>
Kop-staart	Zonder	3.787	243,6	0,064	260,0	0,069	159,9	0,042	13.413,4	3,542
Kop-staart	Met	4.213	257,9	0,061	277,2	0,066	159,1	0,038	13.099,0	3,109
Dwars	Zonder	3.787	25,7	0,007	25,7	0,007	5,7	0,001	2.595,3	0,685
Dwars	Met	4.213	18,8	0,004	18,8	0,004	3,9	0,001	1.883,4	0,447

Tabel 4.1. Indicatoren per simulatie voor kop-staartconflicten en dwarsconflicten op het kruispunt.

De dwarsconflicten betreffen conflicten tussen auto en fiets, de kop-staartconflicten zijn conflicten tussen auto's onderling en tussen fietsers onderling (en niet tussen auto en fiets).

In de simulatie met een incident neemt het aantal kop-staartconflicten iets toe, maar het risico van dit type neemt licht af. Dit geldt ook voor de *TEXT*-indicatoren. *TlnT* en *PCE* nemen iets af, evenals de risicomaten ervan.

Bij alle indicatoren van de dwarsconflicten zien we afnames in de simulatie met een incident.

In dit simulatiemodel verlenen alle fietsers voorrang aan het kruisende autoverkeer. Zoals we gezien hebben leidt het incident op de A4 tot meer kruisend autoverkeer op de parallelweg, niet alleen van links naar rechts, maar ook van rechts naar links. Deze toename ontstaat ten gevolge van de andere routekeuze van voertuigen in het gehele wegennet, onder andere omdat kruispunten verderop in het netwerk (gedeeltelijk) zijn geblokkeerd. Door de toename van het passerende autoverkeer steken in de simulatieperiode minder fietsers over. De resulterende gevolgen voor de veiligheidsindicatoren zijn gering.

Met/ zonder incident	Passerende voertuigen (vrt)	<i>NOC</i>	<i>NOC/vrt</i>	<i>TEXT</i>	<i>TEXT/vrt</i>	<i>TlnT</i>	<i>TlnT/vrt</i>	<i>PCE</i>	<i>PCE/vrt</i>
Zonder	1.307	30,8	0,024	60,7	0,046	100,1	0,077	5.263,0	4,027
Met	1.557	62,0	0,040	95,7	0,061	145,1	0,093	4.807,3	3,088

Tabel 4.2. *Indicatoren per simulatie voor wegvakconflicten op een toeleidend wegvak (autoverkeer rijdt in Afbeelding 3.1 van rechts naar links op de parallelweg).*

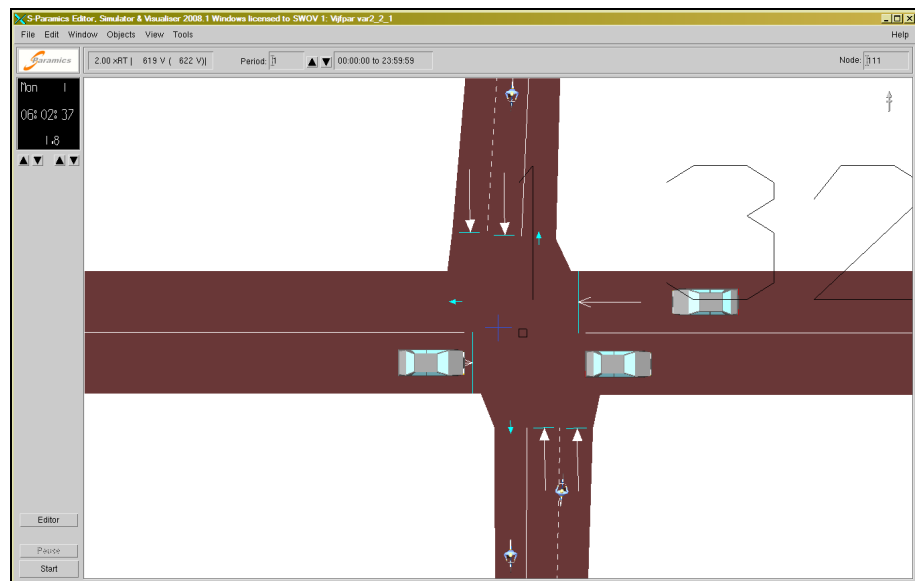
Op de wegvakken in dit netwerk (op een afstand van 50 m of meer van het kruisingsvlak) vinden voornamelijk kop-staartconflicten plaats; er wordt nauwelijks ingehaald, en afslaan alsmede oversteken zijn uitgesloten. Door de toename van het autoverkeer als gevolg van het incident, nemen deze kop-staartconflicten op wegvakken van de parallelweg toe. Dit is ook te zien aan de indicatoren die in *Tabel 4.2* staan vermeld voor een van de toeleidende wegvakken; als voorbeeld is het wegvak met verkeer van rechts naar links gekozen. Op het wegvak heeft de verandering van de indicatoren dus een andere 'richting' dan op het kruispunt. De absolute aantallen nemen toe, behalve bij *PCE*. De risicomaten nemen eveneens toe, met uitzondering van *PCE/vrt*. De energie die bij een botsing zou vrijkomen neemt blijkbaar af. Dit kan optreden als de toename van het aantal kop-staartconflicten gepaard gaat met kleinere snelheidsverschillen. Het effect van een lagere snelheid is groter bij de *PCE* dan bij de andere indicatoren omdat in de berekening van de *PCE* het kwadraat van de snelheid is opgenomen (zie *Bijlage*).

4.2. Voorrangskruispunt voor de fiets

Op dit kruispunttype verleent de auto voorrang aan de fiets. In de situatie zonder incident op het hoofdwegennet, rijden ongeveer duizend fietsers per rijrichting over het kruispunt. Het aantal passerende motorvoertuigen bedraagt 822 van 'links naar rechts' in *Afbeelding 4.2*, en 1.240 van rechts naar links. Deze aantallen voertuigen wijken af van de waarden in *Paragraaf 4.1*. Men zou wellicht verwachten dat in alle simulaties op alle

wegvakken evenveel voertuigen passeren. Want in alle uitgevoerde simulaties vertrekken in beginsel evenveel voertuigen uit alle herkomstlocaties. Maar de aangebrachte verschillen in het bestudeerde kruispunttype leiden tot verschillen in 'weerstand' van de parallelweg. Daardoor kiezen de voertuigen niet in alle simulaties dezelfde route. Dat leidt tot andere aantallen voertuigen in de verschillende simulaties.

De incidenten op de snelweg A4 leiden ook op het kruispunttype met voorrang voor de fiets tot meer autoverkeer op de parallelweg (Afbeelding 3.1). Het autoverkeer van links naar rechts stijgt naar 1.113 motorvoertuigen. In de andere richting neemt het toe naar 1.448. Deze toename belemmert het fietsverkeer niet; er blijven evenveel fietsers oversteken als bij de situatie zonder incident.



Afbeelding 4.2. Gemodelleerd voorrangskruispunt met voorrang voor fietsers die de parallelweg kruisen.

Veiligheidsindicatoren

Alle veiligheidsindicatoren voor kop-staartconflicten gaan omhoog in de situatie met een incident: zie Tabel 4.3. Bij de dwarsconflicten gaan de indicatoren die per voertuig zijn berekend, iets omlaag. Voor veiligheid zijn de dwarsconflicten van meer belang, omdat dergelijke conflicten en ongevallen ernstiger aflopen. Omdat juist deze conflicten afnemen, is dat gunstig voor de veiligheidssituatie.

	Met/ zonder incident	Passerende voertuigen (vrt)	NOC	NOC/vrt	TE _x T	TE _x T/vrt	TInT	TInT/vrt	PCE	PCE/vrt
Kop-staart	Zonder	4.058	693,9	0,171	910,3	0,224	206,5	0,051	28.098,3	6,924
Kop-staart	Met	4.556	1.075,1	0,236	1.483,2	0,326	554,9	0,122	40.560,7	8,903
Dwars	Zonder	4.058	2.092,3	0,516	2.213,8	0,546	939,9	0,232	224.897,5	55,421
Dwars	Met	4.556	2.055,4	0,451	2.147,2	0,471	966,2	0,212	219.497,5	48,178

Tabel 4.3. Indicatoren per simulatie voor kop-staartconflicten en dwarsconflicten.

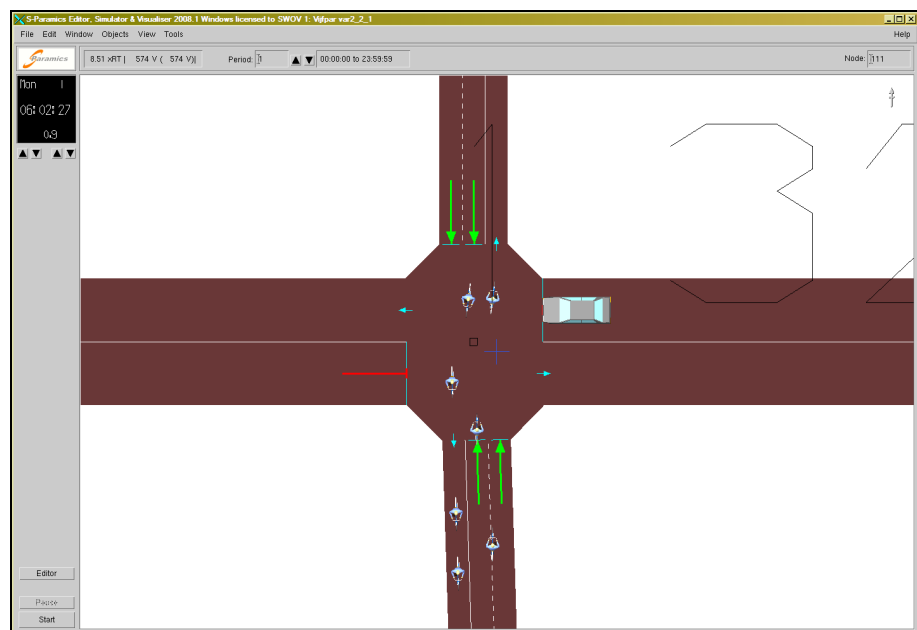
Op het toeleidende wegvak (van rechts naar links op de parallelweg) zijn de indicatoren (sterk) verhoogd in de situatie met een incident (zie *Tabel 4.4*). Het betreft hier voornamelijk kop-staartconflicten. De ernst hiervan is relatief gering. De opgebouwde energie (*PCE*) is echter ook per voertuig iets toegenomen. De motorvoertuigen op het wegvak moeten reageren op voertuigen die bij het kruispunt voorrang verlenen. Daardoor zijn er grotere snelheidsverschillen. Dit beïnvloedt de *PCE*-waarde aanzienlijk (vergelijk met *Tabel 4.2*).

Met/ zonder incident	Passerende voertuigen (vrt)	<i>NOC</i>	<i>NOC/vrt</i>	<i>TE_{xT}</i>	<i>TE_{xT}/vrt</i>	<i>TInT</i>	<i>TInT/vrt</i>	<i>PCE</i>	<i>PCE/vrt</i>
Zonder	1.240	549,5	0,443	748,8	0,604	258,9	0,209	26.044,1	21,003
Met	1.448	1.050,7	0,726	1.388,6	0,959	628,4	0,434	38.312,2	26,459

Tabel 4.4. *Indicatoren per simulatie voor wegvakconflicten op een toeleidend wegvak (autoverkeer rijdt in Afbeelding 3.1 van rechts naar links op de parallelweg).*

4.3. Kruispunt met VRI

In deze varianten is het kruispunt voorzien van een verkeersregelininstallatie met een vaste cyclustijd. In de situatie zonder incident op het hoofdwegennet, rijden weer ongeveer duizend fietsers per rijrichting over het kruispunt. Het aantal passerende motorvoertuigen bedraagt 467 van 'links naar rechts' in *Afbeelding 4.3*, en 1.224 van rechts naar links. Bij de simulatie van incidenten op de snelweg A4 krijgt de parallelweg (*Afbeelding 3.1*) weer meer verkeer te verwerken. Het autoverkeer van links naar rechts stijgt naar 764 motorvoertuigen. In de andere richting neemt het toe naar 1.328. Deze toename in autoverkeer geeft geen veranderingen in het aantal overstekende fietsers.



Afbeelding 4.3. *Gemodelleerd kruispunt met VRI tussen parallelweg en fietspad.*

Veiligheidsindicatoren

In *Paragraaf 3.2* is al een beperking vermeld van de manier waarop de conflicten kunnen worden berekend op kruispunten met VRI. De berekening betreft hier alleen conflicten van voertuigen die zich onderwerpen aan de roodlichtdiscipline! In werkelijkheid zullen dus meer conflicten voorkomen. De kop-staartconflicten op dit kruispunttype nemen toe bij een incident op de snelweg A4 (zie *Tabel 4.5*). De overige indicatoren stijgen ook, met uitzondering van de *PCE*-indicatoren.

	Met/ zonder incident	Passerende voertuigen (vrt)	<i>NOC</i>	<i>NOC/vrt</i>	<i>TExT</i>	<i>TExT/vrt</i>	<i>TInT</i>	<i>TInT/vrt</i>	<i>PCE</i>	<i>PCE/vrt</i>
Kop-staart	Zonder	3.687	281,2	0,076	430,7	0,117	248,7	0,067	19.800,0	5,370
Kop-staart	Met	4.088	370,6	0,091	600,8	0,147	337,6	0,083	19.613,8	4,798
Dwars	Zonder	3.687	302,9	0,082	314,2	0,085	105,4	0,029	27.643,8	7,498
Dwars	Met	4.088	236,8	0,058	247,0	0,060	80,2	0,020	22.103,3	5,407

Tabel 4.5. *Indicatoren per simulatie voor kop-staartconflicten en dwarsconflicten.*

Bij de dwarsconflicten nemen in het geval van een incident, alle indicatoren af. Zoals eerder betoogd, is de ernst van de afloop van dwarsconflicten groter dan van kop-staartconflicten. Dus de onveiligheid in de situatie met een incident is, beide conflicttypen in ogenschouw nemend, niet in ongunstige zin veranderd.

Met/ zonder incident	Passerende voertuigen (vrt)	<i>NOC</i>	<i>NOC/vrt</i>	<i>TExT</i>	<i>TExT/vrt</i>	<i>TInT</i>	<i>TInT/vrt</i>	<i>PCE</i>	<i>PCE/vrt</i>
Zonder	1.224	982,7	0,803	1.722,5	1,407	1.184,1	0,967	78.940,0	64,493
Met	1.328	2.920,0	2,199	4.675,9	3,521	3.044,6	2,293	166.428,8	125,323

Tabel 4.6. *Indicatoren per simulatie voor wegvakconflicten op een toeleidend wegvak (auto verkeer rijdt in Afbeelding 3.1 van rechts naar links op de parallelweg).*

De veiligheidsindicatoren op het wegvak van de parallelweg, van rechts naar links naar het kruispunt toe, nemen sterk toe in de situatie met een incident (zie *Tabel 4.6*). Het is bekend dat kruispunten met verkeersregelinstallaties veel kop-staartconflicten veroorzaken (Dijkstra, 2011). In dit geval strekt dit effect zich uit tot de toeleidende wegvakken. De energieopbouw is sterk verhoogd. De veiligheid op dit deel van de parallelweg is sterk afgenomen.

4.4. Onderlinge vergelijking van kruispunttypen

In de vorige paragrafen is de nadruk gelegd op de vergelijking tussen de situatie met en zonder incident, gegeven een bepaald kruispunttype. In deze paragraaf worden verschillen tussen de drie kruispunttypen centraal gesteld. Deze paragraaf eindigt met een beschouwing over de gevolgen van het gesimuleerde incident voor het gehele gesimuleerde wegennet, en de bijdrage daarin van het kruispunt op de parallelweg .

4.4.1. *Vergelijking kruispunttypen zonder incident*

Het kruispunttype met voorrang voor de fiets laat een veel hoger aantal conflicten zien dan de andere twee typen. In *Tabel 4.7* zijn de indicatoren van de dwarsconflicten, de ernstigste conflicten op deze kruispunten, gegeven voor de drie kruispunttypen. Alle indicatoren van het kruispunttype met voorrang voor fiets, scoren hoger dan de indicatoren van de andere typen. De verschillen tussen kruispunten met VRI en kruispunten met voorrang voor de auto zijn relatief gering als dit wordt afgezet tegen de waarden van kruispunten met voorrang voor de fiets.

Kruispunttype	Passerende voertuigen (vrt)	NOC	NOC/vrt	TEXT	TEXT/vrt	TInT	TInT/vrt	PCE	PCE/vrt
Voorrang auto	3.787	25,7	0,007	25,7	0,007	5,7	0,001	2.595,3	0,685
Voorrang fiets	4.058	2.092,3	0,516	2.213,8	0,546	939,9	0,232	224.897,5	55,421
VRI	3.687	302,9	0,082	314,2	0,085	105,4	0,029	27.643,8	7,498

Tabel 4.7. *Conflictindicatoren voor dwarsconflicten, per kruispunttype, in de situatie zonder incident.*

Op dit kruispunt met voorrang voor de fiets zijn er veel dwarsconflicten tussen auto en fiets. Bij die conflicten liggen de snelheden van het autoverkeer lager dan de snelheidslimiet (80 km/uur). De opgebouwde energie is echter veel groter dan bij de andere kruispunttypen, ook gerekend per voertuig.

4.4.2. *Vergelijking kruispunttypen met incident*

Door het extra autoverkeer op de parallelweg verbetert de situatie niet op het kruispunt met voorrang voor de fiets (zie *Tabel 4.8*). Ook in deze situatie is het een veel onveiligere kruispunt dan de twee andere typen. Vergeleken hiermee zijn de verschillen gering tussen het type met VRI en het type met voorrang voor de auto. Van de drie kruispunttypen is het type met voorrang voor de auto het veiligste.

Kruispunttype	Passerende voertuigen (vrt)	NOC	NOC/vrt	TEXT	TEXT/vrt	TInT	TInT/vrt	PCE	PCE/vrt
Voorrang auto	4.213	18,8	0,004	18,8	0,004	3,9	0,001	1.883,4	0,447
Voorrang fiets	4.556	2.055,4	0,451	2.147,2	0,471	966,2	0,212	219.497,5	48,178
VRI	4.088	236,8	0,058	247,0	0,060	80,2	0,020	22.103,3	5,407

Tabel 4.8. *Conflictindicatoren voor dwarsconflicten, per kruispunttype, in de situatie met incident.*

4.4.3. *Functioneren van het beschouwde hoofdwegennet tijdens een incident*

De incidenten op de snelweg A4 hebben een flinke impact op het wegennet. Gedurende het incident is de A4 in de richting van links naar rechts (*Afbeelding 3.1*) geblokkeerd. Dat veroorzaakt een grote wachtrij bovenstrooms. Door die wachtrij raken kruispunten op de onderliggende wegen geblokkeerd en is slechts een klein deel van het verkeer in staat al bij vertrek een alternatieve route te nemen. De parallelweg is de voor de hand

liggende alternatieve route. Zonder de blokkades zou meer verkeer over de parallelweg kunnen rijden.

In het gehele netwerk zijn ongeveer 250.000 dwarsconflicten geteld. In de situatie met een incident liggen de aantallen lager dan in de reguliere situatie, vooral omdat er minder autoverkeer in beweging is.

Onderzochte kruispunttype	Met/zonder incident	Passerende voertuigen wegennet (vrt)	NOC wegennet	NOC/vrt wegennet	Aandeel van dwarsconflicten op onderzochte kruispunt ten opzichte van alle dwarsconflicten in wegennet (in %)
Voorrang auto	Zonder	255.020	10.741	42,1	0,2
	Met	244.390	10.209	41,8	0,2
Voorrang fiets	Zonder	256.577	11.929	46,5	17,5
	Met	247.530	12.396	50,1	16,6
VRI	Zonder	254.915	11.200	43,9	2,7
	Met	241.536	10.140	42,0	2,3

Tabel 4.9. *Dwarsconflicten en conflictrisico op alle kruispunten in het gesimuleerde wegennet, gerangschikt naar de onderzochte kruispunttypen; ook is het aandeel vermeld van de dwarsconflicten op het onderzochte kruispunt*

Op het onderzochte kruispunt (ongeacht het gekozen type) is het aantal dwarsconflicten slechts een klein deel van alle dwarsconflicten op alle kruispunten in het gesimuleerde wegennet. Bij het type met voorrang voor de fiets is het aandeel het grootst van de onderzochte drie typen, namelijk 17,5 % zonder incident en 16,6 % met incident. Overigens zijn er alleen fietsers aanwezig op het geanalyseerde kruispunt; op de overige kruispunten op het gesimuleerde wegennet rijden alleen auto's.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1. Conclusies

Methode

Het effect van een robuust wegennet op het fietsverkeer is onderzocht met het microsimulatiemodel S-Paramics. Met dat model is een wegennet gesimuleerd waarin na een incident op het hoofdwegennet een deel van het autoverkeer gebruik is gaan maken van onderliggende wegen. Op een van de onderliggende wegen is kruisend fietsverkeer gesimuleerd. Dit geeft een indruk van de hinder (doorstroming, veiligheid) die fietsverkeer op kruispunten kan ondervinden als autoverkeer uitwijkt naar onderliggende wegen.

Het gehanteerde microsimulatiemodel biedt (nog) niet de mogelijkheid om hinder te simuleren die fietsers op wegvakken ondervinden.

Effecten van een robuust wegennet op fietsverkeer

In deze studie is vastgesteld dat de effecten op de doorstroming het grootst zijn op een kruispunt met voorrang voor het autoverkeer. Op zo'n kruispunttype stroomt het fietsverkeer niet meer goed door, nadat autoverkeer uitwijkt naar de onderliggende wegen. Voor de verkeersveiligheid vertoont dit kruispunttype geen nadelige effecten.

Nadelige veiligheidseffecten treden wel op bij een kruispunt met voorrang voor fietsers. Dat kruispunttype laat de fietsers wel goed doorstromen, ondanks de toename van het autoverkeer (ten gevolge van het incident op de snelweg).

Het kruispunt met VRI is voor fiets en auto geschikt voor zowel doorstroming als veiligheid. Overigens geeft dit simulatiemodel een onderschatting van de onveiligheid op dit kruispunttype doordat het effect van roodlichtnegatie ontbreekt.

5.2. Aanbevelingen

Methode

- Simulatie van fietsers op wegvakken ontbreekt nog in het gebruikte model. Er moet worden nagegaan of er mogelijkheden zijn om met dit model of met een ander simulatiemodel, fietsers te kunnen simuleren op wegvakken.
- De simulatie van kruispunten met VRI behoeft verbetering om het effect van roodlichtnegatie en 'voorrangnegatie' in de veiligheidsindicatoren te kunnen verwerken.
- De analyse zou verdiept worden met aanvullende indicatoren die de (veranderingen in) snelheid en snelheidsverschillen laten zien.

Robuust wegennet en fietsverkeer

Het verdient aanbeveling nadere richtlijnen op te stellen voor de uitwerking van een robuust wegennet. In die richtlijnen moet de positie van de fiets nadrukkelijk worden ingepast. Dit is nodig om te voorkomen dat een robuust wegennet onbedoelde negatieve effecten kan hebben op fietsverkeer.

Literatuur

- CROW (2008). *Turborotondes*. Publicatie 257. CROW kenniscentrum voor verkeer, vervoer en infrastructuur, Ede.
- Dijkstra, A. (2010). *Veilig samenspel van wegenstructuur, verkeerscirculatie en routekeuze*. R-2010-29. SWOV, Leidschendam.
- Dijkstra, A. (2011). *En route to safer roads; How road structure and road classification can affect road safety*. Proefschrift Universiteit Twente. SWOV-Dissertatiereeks. SWOV, Leidschendam.
- Dijkstra, A. & Drolenga, J. (2006). *Verkeersveiligheidsevaluaties van routekeuze; bouwstenen voor een methode gebaseerd op het gebruik van microsимулатiemodellen*. R-2006-19. SWOV, Leidschendam.
- Dijkstra, A. & Tromp, H.L. (2010). *Gaat een robuust wegennet samen met Duurzaam Veilig? Verslag van een pilotstudie*. R-2010-24. SWOV, Leidschendam.
- Immers, L.H., Wilmink, I.R. & Stada, J.E. (2001). *Bypasses voor bereikbaarheid*. Rapport Inro-VV/2001-28. Afdeling verkeer en vervoer. TNO Inro, Delft.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2008). *Mobiliteitsaanpak: Vlot en veilig van deur tot deur*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage.
- Schrijver, J., Egeter, B., Immers, B. & Snelder, M. (2008). *Visie robuust wegennet ANWB*. Rapport 2008-D-R0661/B. TNO Mobiliteit en Logistiek, Delft.
- SWOV (2010). *Factsheet Oversteekvoorzieningen voor fietsers en voetgangers*. Versie maart 2010. SWOV, Leidschendam.
- Wismans, L. (2003). *Modelkeuze; Notitie ter ondersteuning van de modelkeuze*. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam. [Intern rapport].

In deze bijlage geven we een beschrijving van vier voertuigafhankelijke verkeersveiligheidsindicatoren voor routes. Deze zijn gerelateerd aan de time-to-collision (*TTC*). De *TTC* is de resterende tijdsduur tot een botsing met een voorliggend (op wegvakken) of conflicterend (op kruispunten) voertuig, als beide voertuigen hun koers en snelheid niet zouden aanpassen. Om deze verkeersveiligheidsindicatoren voor routes te kunnen berekenen dienen we eerst de *TTC* op voertuigniveau te bepalen, hierbij onderscheid makend in voertuigen die zich op wegvakken bevinden en op kruispunten. De methode hiervoor wordt verderop toegelicht. Op basis van de *TTC* op voertuigniveau worden vervolgens vier verkeersveiligheidsindicatoren op voertuigniveau bepaald:

- aantal conflicten (Number of Conflicts; *NOC*);
- tijdsduur van conflicten (Time Exposed *TTC*; *TExT*);
- sterkte van conflicten (Time Integrated *TTC*; *TInT*);
- potentiële botsenergie (Potential Collision Energy; *PCE*).

Bij het berekenen van conflicten speelt de kleinste acceptabele *TTC*-waarde, de zogeheten kritieke waarde, een belangrijke rol.

Berekening time-to-collision op voertuigniveau

De time-to-collision staat voor de tijdsduur tot een botsing met een voorliggend (op wegvakken) of conflicterend (op kruispunten) voertuig als beide voertuigen hun koers en snelheid niet aanpassen. De *TTC* is een indicator voor een verkeersconflict en is dus gerelateerd aan het ongevalsrisico. Kleine *TTC*'s betekenen een hoger ongevalsrisico, grote *TTC*'s betekenen een lager ongevalsrisico.

Een netwerk in een microsimulatiemodel kan opgedeeld worden in wegvakken en kruispunten. Dit is van belang omdat de bepaling van een *TTC* voor een voertuig op een wegvak verschilt met die van een *TTC* op een kruispunt. Een *TTC*-waarde voor een voertuig op een wegvak wordt gebaseerd op zijn voorligger, bij een kruispunt wordt de *TTC*-waarde berekend op basis van een of meer voertuig(en) op een andere tak van het kruispunt. Daarnaast kan een voertuig op een wegvak op een willekeurig tijdstip hoogstens één *TTC*-waarde hebben, op een kruispunt kan een voertuig meer dan één *TTC*-waarde tegelijk hebben.

Onderscheid wegvakken en kruispunten: veilige stopafstand

De grenslijn tussen het eind van een wegvak en het begin van een kruispunt wordt vastgelegd door de veilige stopafstand, kortweg de *VSA* genoemd. De *VSA* voor een voertuig *i* op wegvak *j* bestaat uit twee delen, een afstand die het voertuig aflegt gedurende de reactietijd van de bestuurder en een afstand die het voertuig als remweg heeft door de gekozen remvertraging:

$$VSA_{ij} = \left(\frac{V_j}{3,6} \times rt_i \right) + \left(\frac{V_j^2}{2 \times 3,6^2 \times A_i} \right) \quad (1)$$

waarin V_j de snelheidslimiet in km/uur voor wegvak j , rt_i de reactietijd van voertuig (bestuurder) i in seconden en A_i de remvertraging in m/s^2 van voertuig i (PIARC, 2004; p. 391).

Reactietijd

De reactietijd is de tijd tussen het ontvangen van informatie en het ondernemen van een actie ten gevolge van deze informatie. Lamm, Psarianos & Mailaender (1999) constateren dat de reactietijd varieert van bestuurder tot bestuurder en een functie is van alertheid, complexiteit en verwachting. De alertheid van de bestuurder heeft te maken met zijn of haar fysieke toestand. Hierbij kan vermoeidheid een rol spelen. Maar ook afleiding, zoals mobiel bellen of het praten met een bijrijder kan invloed hebben op de alertheid van de bestuurder.

Daarnaast is de mate waarin een hindernis verwacht wordt bepalend voor de reactietijd. Wanneer een bestuurder op een autosnelweg plotseling een hindernis waarneemt zal de reactietijd langer zijn dan wanneer een bestuurder een kruispunt nadert. Bij het kruispunt is de kans op een hindernis groter en kan de bestuurder dit verwachten.

De relatie tussen de reactietijd in seconden en de complexiteit beschrijven Lamm, Psarianos & Mailaender (1999) voor een gemiddelde en een 'trage' bestuurder (percentiel 85%). De hoeveelheid informatie die nodig is om te besluiten tussen twee gelijkwaardige alternatieven noemt men een 'bit'. Beginnend bij een 'nulbitbeslissing', waarbij er slechts een alternatief is (naast 'geen actie'), heeft een bestuurder tijd nodig om tot actie over te gaan. Die tijd neemt toe naar gelang het aantal bits stijgt. Voor een 85-percentielbestuurder ligt de reactietijd bij een verwachte nulbitbeslissing op 1 seconde, en bij een verwachte eenbitbeslissing op 1,75 seconden. Bij een onverwachte nulbitbeslissing heeft de 85-percentielbestuurder een reactietijd van 1,5 seconde, bij een eenbitbeslissing 2,5 seconden.

De keuze van een kenmerkende reactietijd om de veilige stopafstand mee te berekenen, is dus erg afhankelijk van aannames omtrent de complexiteit en het 'soort' bestuurder.

Remvertraging

De remvertraging is een voertuigeigenschap. Voor een personenauto is een gemiddelde remvertraging van $4,0 m/s^2$ kenmerkend, voor een bestelbus $3,7 m/s^2$, voor een middelgrote vrachtwagen (15 ton) $3,2 m/s^2$, en voor een grote vrachtwagen (38 ton) $3,0 m/s^2$.

Veilige stopafstand VSA

Als voorbeeld nemen we een reactietijd aan van 1 seconde en een remvertraging van $4 m/s^2$. De veilige stopafstanden zijn voor een aantal snelheidslimieten weergegeven in *Tabel A1*. Zoals hiervoor beschreven is de veilige stopafstand opgebouwd uit een reactieweg en een remweg.

Snelheidslimiet (km/uur)	Reactieweg (m)	Remweg (m)	Veilige stopafstand (m)
30	8,3	8,7	17,0
50	13,9	24,1	38,0
70	19,4	47,3	66,7

Tabel A1. *Veilige stopafstanden bij verschillende snelheidslimieten, en bij een reactietijd van 1 seconde en een remvertraging van $4 m/s^2$.*

TTC op wegvakken

Voor de voertuigen op wegvakken en waarvan de nog af te leggen afstand tot een kruispunt groter is dan de VSA van het betreffende wegvak, gaan we na of er een voorligger¹ aanwezig is:

Voorligger aanwezig

Als een voertuig een voorligger heeft wordt de TTC voor voertuig i op tijdstip t ten opzichte van een leidend voertuig $i-1$ berekend volgens de onderstaande formule (Minderhoud & Bovy, 2001):

$$TTC_i(t) = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_i}{V_i(t) - V_{i-1}(t)} \quad \text{als } d_{ij}(t) \geq VSA_j$$

waarin X de positie, l de afstand tussen de voertuigen i en $i-1$, V de snelheid, d_{ij} de afstand van voertuig i tot het einde van wegvak j , en waarin VSA_j bepaald wordt volgens *Formule 1*.

De TTC kan alleen berekend worden als het volgende voertuig sneller rijdt dan het voorliggende voertuig. Als dat voorliggende voertuig sneller rijdt dan het volgende voertuig is de TTC negatief; er zal dan geen botsing plaatsvinden. Als de voertuigen precies dezelfde snelheid hebben is de TTC nul, en ook dan zal er geen botsing plaatsvinden.

Geen voorligger aanwezig

Als er geen voertuig voor het beschouwde voertuig rijdt bestaat er op dat moment geen TTC-waarde en wordt het voertuig 'vrij' genoemd.

TTC op kruispunten

Een voertuig 'nadert een kruispunt' als de afstand tot het kruispunt kleiner is dan de veilige stopafstand VSA van het wegvak. De TTC voor een voertuig dat een kruispunt nadert, is óf een TTC die in interactie met een voertuig op dezelfde stroom wordt berekend, óf een of meer TTC's op basis van een voertuig op een of meer conflicterende stromen. Vogel (2003) maakt onderscheid in 'passieve' en 'actieve' voertuigen.

Passieve voertuigen

Een voertuig wordt passief genoemd als het een voorligger heeft op dezelfde kruispunttak, dat wil zeggen een voertuig waarvan de afstand tot het kruispunt kleiner is dan die van het beschouwde voertuig. De TTC-waarde voor een passief voertuig berekenen we op basis van zijn voorligger, net zoals bij de methode voor voertuigen waarvan de afstand tot een kruispunt groter is dan de VSA, zie *Formule 1*.

Actieve voertuigen

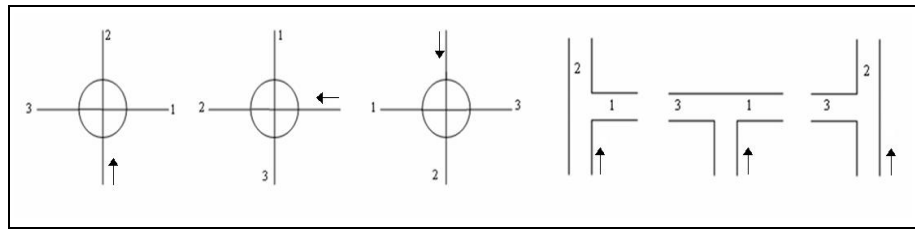
Een actief voertuig is een voertuig dat in conflict komt met een voertuig op een conflicterende stroom of met meer voertuigen op verschillende conflicterende stromen tegelijk.

Conflicterende stromen

De conflicterende stromen voor een voertuig worden bepaald door het type kruispunt (drie- of viertaks) en de manoeuvres (rechtsaf, rechtdoor of linksaf) van zowel het beschouwde voertuig als die van het potentieel conflicterende voertuig. De potentiële conflictstromen worden tegen de klok in genummerd.

¹ Een eventuele voorligger kan zich al wél binnen de VSA tot een kruispunt bevinden.

Afbeelding A1 bevat een aantal voorbeelden van deze nummering voor een voertuig i (voorgesteld door een pijltje) rijdend op een viertakskruispunt (aan de linkerkant van de afbeelding) of op een drietakskruispunt (aan de rechterkant van de afbeelding).



Afbeelding A1. Nummering takken van viertaks- en drietakskruispunten.

Twee conflicterende voertuigen voeren allebei een manoeuvre uit. In Tabel A2 worden voor voertuig i , met manoeuvre m , de potentiële conflicten gedefinieerd en benoemd met voertuig j , zich bevindend op tak n met manoeuvre o .

Manoeuvre m	Tak n	Manoeuvre o	Conflicttype
RA	2	LA	Convergerend
RA	3	RD	Convergerend
RD	1	RA	Convergerend
RD	1	RD	Dwars
RD	1	LA	Dwars
RD	2	LA	Frontaal
RD	3	RD	Dwars
RD	3	LA	Convergerend
LA	1	RD	Convergerend
LA	1	LA	Dwars
LA	2	RA	Convergerend
LA	2	RD	Frontaal
LA	3	RD	Dwars
LA	3	LA	Dwars

Tabel A2. Conflicterende stromen, met als manoeuvres RA = rechtsaf; RD = rechtdoor; LA = linksaf.

Benodigde tijd tot conflictvlak

Per tijdstap t wordt voor beide actieve voertuigen de benodigde tijd geschat om het 'conflictvlak' te bereiken. De afmetingen van dit conflictvlak worden bepaald door de breedte van beide voertuigen. De geschatte tijd is de afstand tot het conflictvlak gedeeld door de snelheid. In formulevorm (Van der Horst, 1990):

$$AT_i(t) = \frac{d_i(t)}{V_i(t)}$$

waarin AT_i de benodigde tijd voor voertuig i om het conflictvlak te bereiken op tijdstip t , d_i de afstand tot het conflictvlak op tijdstip t en V_i de snelheid op tijdstip t .

Eerste voertuig

Met de geschatte aankomsttijden per tijdstap wordt vervolgens bepaald welk voertuig als eerste aan zal komen op het conflictvlak, dat wil zeggen welk voertuig de laagste AT heeft, bepaald met bovenstaande formule. Het voertuig dat als eerste zal aankomen wordt voertuig i genoemd, het tweede voertuig is voertuig k .

Ontruimingstijd

Voor het voertuig dat als eerste zal aankomen op het conflictvlak (voertuig i) wordt de tijd berekend die nodig is om het conflictvlak weer te verlaten. Deze benodigde tijd is het tijdsverschil tussen het geschatte moment dat het voertuig het conflictvlak betreedt (AT_i) en het geschatte moment dat het voertuig het conflictvlak verlaat. Voor convergerende conflicten is de benodigde ontruimingstijd TO voor voertuig i op tijdstip t gelijk aan (Van der Horst, 1990):

$$TO_i(t) = \frac{l_i + b_k}{V_i(t)}$$

waarin l_i de lengte van voertuig i , b_k de breedte van voertuig k en $V_i(t)$ de snelheid van voertuig i op tijdstip t .

Deze formule is geschikt voor alle convergerende conflicten. Maar ook bij andere conflicttypen is er een gebied waarin deze formule bruikbaar is. Bijvoorbeeld bij een frontaal conflict wanneer beide voertuigen elkaar onder een (kleine) hoek raken (zie *Tabel A2*).

Botskoers

Actieve voertuigen liggen op botskoers als het verschil tussen de aankomsttijden van beide voertuigen i en k kleiner is dan de benodigde ontruimingstijd van het eerste voertuig i :

$$AT_k(t) - AT_i(t) < TO_i(t)$$

Als dit het geval is, is de TTC gelijk aan de aankomsttijd van het tweede voertuig:

$$TTC_{i,k}(t) = AT_k(t)$$

Als het verschil tussen de aankomsttijden van beide voertuigen groter is dan de benodigde ontruimingstijd van het eerste voertuig liggen de voertuigen niet op botskoers en vindt geen berekening van de TTC plaats.

Vrije voertuigen

Een voertuig is vrij als er geen andere voertuigen op conflicterende stromen aanwezig zijn. Voor een vrij voertuig bestaat er geen TTC -waarde.

Van TTC naar verkeersveiligheidsindicatoren op voertuigniveau

Als een TTC van een voertuig onder een kritieke TTC -waarde komt, kan er worden gesproken van een onveilige situatie, aangeduid als een conflict-situatie. Tijdens een rit kan een voertuig diverse ontmoetingen hebben, en dus ook verscheidene conflictsituatie meemaken als de TTC meer dan één keer onder deze kritieke waarde komt.

Minderhoud & Bovy (2001) concluderen dat er in verschillende onderzoeken verschillende waarden voor kritieke TTC 's worden gehanteerd. Volgens

Archer (2005) is een *TTC* van 1,5 seconde de kritieke waarde voor de verkeersveiligheid in stedelijk gebied. Van der Horst (1990) neemt in zijn analyse alle *TTC*-waarden mee die lager zijn dan 2,5 seconde. Er zijn kennelijk verschillende kritieke waarden van *TTC* te rechtvaardigen. Lu et al. (2001) maken in hun studie naar de *TTC* op kruispunten onderscheid in drie klassen conflictisico's op grond van verschillende *TTC*-waarden (zie *TabelA3*).

Conflictisico	<i>TTC</i> -waarde
Laag	$1,5 \text{ sec} \geq \textit{TTC} < 2,0 \text{ sec}$
Gemiddeld	$1,0 \text{ sec} \geq \textit{TTC} < 1,5 \text{ sec}$
Hoog	$\textit{TTC} < 1,0 \text{ sec}$

Tabel A3. *Risiconiveaus van conflicten, afhankelijk van de TTC-waarde (Lu, et al., 2001).*

In de volgende paragrafen zullen naast het aantal conflicten (NOC) een drietal andere verkeersveiligheidsindicatoren op voertuigniveau worden geïllustreerd: de tijdsduur van conflicten (*TExT*), de sterkte van conflicten (*TInT*) en de potentiële botsenergie (*PCE*).

Aantal conflicten (Number of Conflicts, NOC)

In de meeste gevallen is op een wegvak of kruispunt ook ander verkeer aanwezig en vinden er ontmoetingen plaats. Dit zijn situaties waarbij twee voertuigen elkaar in de tijd en de ruimte naderen en waar ze elkaars gedrag onderling kunnen beïnvloeden. Bij het overgrote deel van de ontmoetingen is een gecontroleerde aanpassing van koers of snelheid voldoende om de ontmoeting normaal af te wikkelen.

Onder een conflict wordt een kritische verkeerssituatie verstaan waarbij twee (of meer) weggebruikers elkaar zodanig naderen dat een botsing dreigt en er een reële kans is op lichamelijk letsel of materiële schade als hun koers en snelheid onveranderd blijven. De FHWA (2003) definieert een conflict als een waar te nemen situatie waarin twee of meer voertuigen elkaar in ruimte en tijd naderen en er risico op botsen is indien hun bewegingen onveranderd blijven.

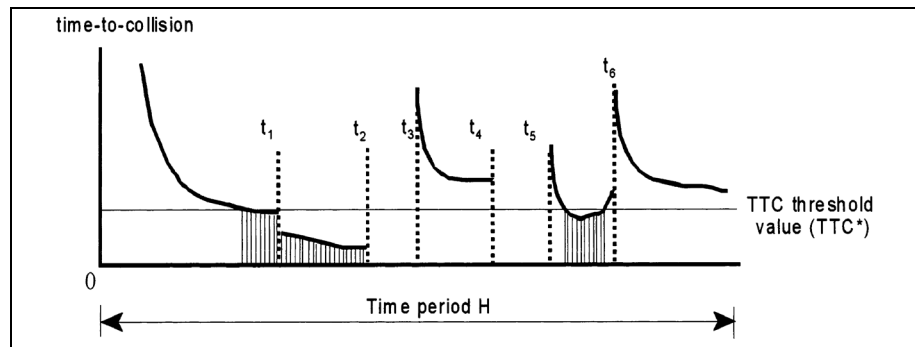
In deze *bijlage* is de *TTC* als maat voor een conflict genoemd. Deze maat is bruikbaar bij bestudering van één conflict. Een voertuig raakt echter gedurende een rit meestal betrokken bij meer conflicten. Om daar uitdrukking aan te geven hanteren we voor de conflicten waar voertuig *i* bij betrokken raakt de indicator NOC_i :

$$NOC_i = \sum_{n=0}^T \delta_i(\zeta_n)$$

waarin: $\delta_i(\zeta_n) = 1$ als: $0 \leq \textit{TTC}_i(\zeta_n) \leq \textit{TTC}^*$ en $\textit{TTC}_i(\zeta_{n+1}) > \textit{TTC}^*$ en
 $= 0$ anders.

\textit{TTC}_i is de *TTC* voor voertuig *i* op tijdstip *t* zoals hiervoor berekend, \textit{TTC}^* de kritieke *TTC*-waarde, ζ_0 het tijdstip dat voertuig *i* het netwerk betreedt en ζ_T het tijdstip dat het voertuig het netwerk verlaat.

In het volgende voorbeeld van Minderhoud & Bovy (2001) is gedurende de tijdsperiode H het verloop van de TTC van een voertuig weergegeven (zie *AfbeeldingA2*). Hierin komt de TTC twee keer onder de kritieke TTC -waarde en is voertuig i zodoende bij twee conflicten betrokken.



Afbeelding A2. Het TTC -verloop van een voertuig met twee conflicten gedurende tijdsperiode H (Minderhoud & Bovy, 2001).

Voor een voertuig kan het totaal aantal conflicten gedurende zijn rit door het netwerk bepaald worden. Ook kan ervoor gekozen worden om onderscheid te maken naar conflicttypen: conflicten op wegvakken en op kruispunten. Laatstgenoemde conflicten kunnen weer onderscheiden worden naar frontale conflicten, dwarsconflicten en convergerende conflicten. Door de laagst behaalde (of eigenlijk berekende) TTC -waarden van voertuigen in conflictsituaties te verdelen in een aantal klassen, kan een indicatie van de verkeersveiligheid op wegvakken en kruispunten, routes en een geheel netwerk verkregen worden.

Tijdsduur van conflicten (Time Exposed Time-to-collision; $TExT$)

De NOC -indicator laat wel het aantal, maar niet de duur van de vastgestelde conflicten zien. De $TExT$ -indicator (Time Exposed Time-to-collision) geeft aan dat de TTC van een voertuig zich, gedurende een bepaalde tijdsperiode, onder een kritieke waarde (TTC^*) begeeft. De $TExT$ is dus een sommatie van de momenten dat een voertuig een TTC heeft onder de TTC^* . Dat betekent dat hoe kleiner de $TExT$ is hoe minder lang een voertuig zich in een conflictsituatie bevindt en dus hoe verkeersveiliger de situatie is.

In het voorbeeld van *AfbeeldingA2* is de tijd dat de TTC van het voertuig onder de TTC^* (horizontale lijn) komt af te lezen aan de verticale arcering. Deze momenten bij elkaar opgeteld geeft de waarde van de $TExT$ -indicator. In formulevorm:

$$TExT_i^* = \sum_{t=0}^T \delta_i(t) \cdot \tau_{sc}$$

waarin: $TExT_i^*$ = $TExT$ -waarde voor voertuig i

$$\delta_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{als: } 0 \leq TTC_i(t) \leq TTC^* \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

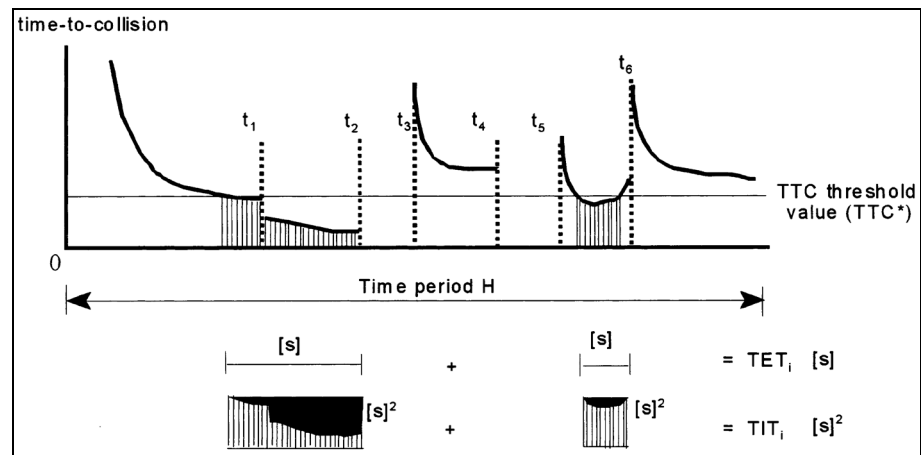
$$\tau_{sc} = \text{tijdstep (sec)}$$

Sterkte van conflicten (Time Integrated Time-to-collision; *TInT*)

De *TExT*-indicator laat wel zien hoe lang, maar niet hoeveel de *TTC*-waarden lager liggen dan de kritieke waarde. Als voorbeeld een situatie waarbij een kritieke *TTC** van 3 seconden is ingesteld: een *TTC* die gedurende 3 seconden een waarde van 1 seconde heeft wordt in de berekening van de *TExT* indicator even zwaar meegerekend als een *TTC* die gedurende 3 seconden een waarde van 2 seconden heeft. In het eerste geval is er echter sprake van een onveiligere situatie dan in het tweede geval. Om de sterkte van de *TTC*-waarde mee te laten tellen is de *TInT*-indicator ontwikkeld. De Time Integrated Time-to-collision (*TInT*) berekent 'het oppervlak' dat optreedt tussen de *TTC** en de *TTC*. In formulevorm:

$$TInT_i^* = \sum_{t=0}^T [TTC^* - TTC_i(t)] \cdot \tau_{sc} \quad \text{voor } 0 \leq TTC_i(t) \leq TTC^*$$

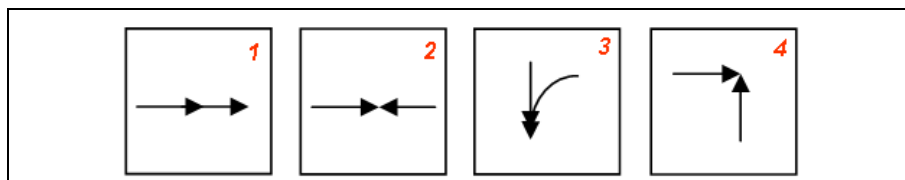
In *Afbeelding A3* zijn zowel de *TExT*-waarden als de *TInT*-waarden uit het voorbeeld van *Afbeelding A2* gevisualiseerd.



Afbeelding A3. Time Exposed Time-to-collision (in sec) en Time Integrated Time-to-collision (in sec²) bij een gegeven TTC-verloop (Minderhoud & Bovy, 2001).

Potentiële botsenergie (Potential Collision Energy, *PCE*)

De drie conflictmaten die hiervoor zijn besproken geven nog geen zicht op de mogelijke gevolgen van een conflict. Een manier om de *impact* van een conflict weer te geven is via de potentiële botsenergie. Die geeft aan hoeveel energie vrijkomt als de voertuigen die met elkaar in conflict zijn tegen elkaar zouden botsen. De potentiële botsenergie is opgebouwd uit de massa's en snelheden van de betrokken voertuigen en de manier waarop die voertuigen elkaar raken: het type conflict. Op wegvakken onderscheiden we alleen langsconflicten (type 1 in *Afbeelding A4A4*) en op kruispunten frontale conflicten (type 2), convergerende conflicten (type 3) en dwarsconflicten (type 4).



Afbeelding A4. Conflicttypen.

Langsconflict

Voor de berekening van de potentiële botsenergie PCE_T op tijdstip t bij een langsconflict tussen voertuig i met massa m_i en voertuig k met massa m_k wordt de kinetische energie van beide voertuigen van elkaar afgetrokken. In formulevorm:

$$PCE_T(t) = \frac{1}{2}(m_i \cdot v_i^2(t) - m_k \cdot v_k^2(t))$$

waarin m is massa en v is snelheid.

Frontaal conflict en dwarsconflict

Voor de berekening van de potentiële botsenergie PCE_T op tijdstip t bij een frontaal conflict of een dwarsconflict tussen voertuig i en voertuig k wordt de kinetische energie van beide voertuigen bij elkaar opgeteld. In formulevorm:

$$PCE_T(t) = \frac{1}{2}(m_i \cdot v_i^2(t) + m_k \cdot v_k^2(t))$$

Convergerend conflict

Voor de berekening van de potentiële botsenergie PCE_T op tijdstip t bij een convergerend conflict tussen voertuig i en voertuig k wordt de kinetische energie van beide voertuigen bij elkaar opgeteld en gecorrigeerd door een factor voor de hoek tussen de voertuigen (aangenomen hoek is 45°). In formulevorm:

$$PCE_T(t) = \frac{1}{4}(m_i \cdot v_i^2(t) + m_k \cdot v_k^2(t))$$

Verdeling PCE over voertuigen

De totale potentiële botsenergie PCE_T die vrijkomt als de voertuigen i en k met massa m zouden botsen op tijdstip t berekenen we met de drie hiervoor gegeven formules. Deze energie wordt naar massa verdeeld over de voertuigen. Het lichtste voertuig krijgt het grootste deel van de potentiële botsenergie te verwerken, het zwaarste voertuig het kleinste deel. De te verwerken potentiële botsenergie PCE voor voertuig i wordt als volgt berekend:

$$PCE_i(t) = \frac{m_k}{m_i + m_k} \cdot PCE_T(t)$$

en analoog voor voertuig k :

$$PCE_k(t) = \frac{m_i}{m_i + m_k} \cdot PCE_T(t)$$

Referenties

Archer, J. (2005). *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modeling; A study of urban and*

suburban intersections. Doctoral Thesis. Centre for Traffic Simulation Research, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Horst, A.R.A. van der (1990). *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. PhD thesis Delft University of Technology. Institute for Perception IZF TNO, Soesterberg.

Lamm, R., Psarianos, B. & Mailaender, T. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. McGraw-Hill, New York etc.

Lu, J., Dissanayake, S., Castillo, N. & Williams, K. (2001). *Safety evaluation of right turns followed by U-turns as an alternative to direct left turns; Conflict analysis*. Florida Department of Transport, Tallahassee.

Minderhoud, M.M. & Bovy, P.H.L. (2001). *Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment*. In: Accident Analysis and Prevention, vol. 33, p. 89-97.

PIARC (2004). *Road safety manual*. World Road Association PIARC, Paris.

Vogel, K. (2003). *A comparison of headway and time to collision as safety indicators*. In: Accident Analysis and Prevention, vol. 35, p. 427-433.