

# **Verkeersmodellen en verkeersveiligheid**

Ir. P.L.J. Morsink (SWOV) & ir. L.J.J. Wismans (Goudappel Coffeng)

D-2008-1



## **Verkeersmodellen en verkeersveiligheid**

Verkenning van toepassingsmogelijkheden van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek

## Documentbeschrijving

Rapportnummer:	D-2008-1
Titel:	Verkeersmodellen en verkeersveiligheid
Ondertitel:	Verkenning van toepassingsmogelijkheden van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek
Auteur(s):	Ir. P.L.J. Morsink (SWOV) & ir. L.J.J. Wismans (Goudappel Coffeng)
Projectleider:	Ir. P.L.J. Morsink
Projectnummer SWOV:	39.255
Trefwoord(en):	Traffic, transport, mathematical model, impact study, intelligent transport system, accident prediction, SWOV.
Projectinhoud:	Verkeersmodellen worden al langere tijd gebruikt voor de evaluatie van infrastructurele en verkeersmanagementmaatregelen ten aanzien van verkeersdoorstroming en reistijden. Dit rapport bespreekt mogelijke toepassingen van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek. Het richt zich vooral op het gebruik van verkeersmodellen voor de effectschatting van Intelligente Transportsystemen.
Aantal pagina's:	56 + 4
Prijs:	€ 11,25
Uitgave:	SWOV, Leidschendam, 2008

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](mailto:info@swov.nl)  
Internet [www.swov.nl](http://www.swov.nl)

# Samenvatting

Dit rapport bespreekt de mogelijkheden van het toepassen van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek, op basis van literatuurstudie en interviews met experts. Onderzoek met verkeersmodellen is relatief nieuw in het werkveld van de verkeersveiligheid. Al langer worden verkeersmodellen gebruikt voor de evaluatie van infrastructurele en verkeersmanagementmaatregelen ten aanzien van verkeersdoorstroming en reistijden. Het gebruik van verkeersmodellen bij verkeersveiligheidsonderzoek richt zich vooral op de effectschatting ('impact assessment') van Intelligente Transportsystemen (ITS) en het gebruik van kencijfers en Accident Prediction Models (APM) in combinatie met een verkeersmodel.

De nadruk ligt in dit rapport op het eerste onderwerp, waarbij veel activiteiten gerapporteerd worden rondom de 'impact assessment' van Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). In toenemende mate worden daarvoor modellen voor dynamische microsimulatie gebruikt. Deze modellen berekenen de verkeersafwikkeling in een netwerk van bijvoorbeeld een stad, of route, waarin een totaalbeeld van het verkeer wordt samengesteld uit bewegingen van individuele verkeersdeelnemers op wegvakken en kruispunten. Onderzoekscases worden gedefinieerd op basis van variaties in een (beperkt) aantal gedragskenmerken en -regels, de hoeveelheid en samenstelling van het verkeer, de opzet van het netwerk en penetratiegraden van ADAS. Effecten op de verkeersveiligheid worden geschat met afgeleide indicatoren die een (meestal kwalitatieve) relatie met ongevallen hebben.

De toepassing van kencijfers vindt vooral plaats bij macroscopische modellen. Deze modellen berekenen de verkeersafwikkeling in termen van geaggregeerde grootheden als intensiteiten en gemiddelde snelheid van verkeersstromen. Bij een toenemende nauwkeurigheid van microscopische modellen en APM's zijn er ook interessante mogelijkheden om meer gedetailleerde verkeersveiligheidskennis in kencijfers op te nemen.

Voor de 'impact assessment' van in-voertuig-ADAS zijn dynamische, microscopische verkeersmodellen vooral zinvol in combinatie met andere methoden, zoals rijnsimulatoronderzoek en 'field operational tests' (FOT). Onder uitsluiting van omgevingsinvloeden kunnen de modellen een schatting geven van de effecten van individuele maatregelen of ontwikkelingen, en de gevoeligheid van modeluitkomsten vaststellen voor specifieke variabelen of condities. Daarbij kunnen effecten bekeken worden op zowel lokaal als netwerkniveau, ook met betrekking tot gegevens die moeilijk empirisch te verkrijgen zijn. Ook kan verkeersveiligheid worden beschouwd samen met andere doelen in het verkeers- en vervoersbeleid (efficiëntie, milieu), en biedt de software vaak goede visualisatiemogelijkheden.

Een belangrijke kanttekening is de beperkte hoeveelheid specifieke verkeersveiligheidskennis in de huidige verkeersmodellen. In belangrijke mate komt dit doordat verkeersmodellen historisch gezien niet vanuit het oogpunt van verkeersveiligheid ontwikkeld zijn. Dit uit zich in de opzet en

kwaliteit van de gedragsmodellen voor individuele verkeersdeelnemers. Daarnaast zijn afgeleide indicatoren nodig vanwege een gebrek aan relevante statische ongevalldata. Daarbij is er nog onduidelijkheid over de vorm van de causale verbanden die veelgebruikte indicatoren zoals ongevallen hebben met time-to-collision (TTC) en varianten daarop. Overigens hebben andere methoden voor 'impact assessment' van ADAS hier evenzeer last van. Daarom is het gebruik van deze indicatoren in kwantitatieve zin niet maar in kwalitatieve zin wel nuttig, vooropgesteld dat voertuigbewegingen voldoende nauwkeurig worden gemodelleerd.

Voor zowel de 'impact assessment' als de kencijfertoepassingen worden verkeersmodellen zinvol geacht voor ex-ante-evaluaties, waarbij de veiligheidseffecten van scenario's van maatregelenpakketten of alternatieve systeemontwerpen met elkaar worden vergeleken. De uitkomsten moeten daarbij kwalitatief en op een geaggregeerd niveau worden beschouwd. De uitkomsten kunnen dan richting geven aan vervolgonderzoek, en in een vroeg stadium het besluitvormingsproces ondersteunen.

Op de wat langere termijn zouden de modellen een meer kwantitatieve voorspelling van ongevallen kunnen geven, bij voortschrijdende algemene kennis op het gebied van verkeersveiligheid en verkeersmodellering. Belangrijke aandachtspunten daarin zijn de modellering van menselijk verkeersgedrag, zowel met als zonder ADAS, en de validatie van veiligheidsindicatoren.

# Summary

## **Traffic models and road safety; Exploration of the possibilities to use traffic models in road safety research**

Based on a literature study and interviews with experts, this report discusses the possibilities to use traffic models in road safety research. Research making use of traffic models is relatively new in the field of road safety. Traffic models have already been used for some time now for the evaluation of infrastructural and traffic management measures aimed at the traffic flow and travelling times. Traffic models in road safety research are mainly used for impact assessment of Intelligent Transport Systems (ITS) and combining core data and Accident Prediction Models (APM) with a traffic model.

This report pays particular attention to the first topic, reporting many activities concerning the impact assessment of ADAS. To this end, models for dynamic micro-simulation are being used increasingly. These models calculate the traffic flow in a road network in a city or along a route, for which an overall picture of the traffic is compiled from movements of individual road users on road sections and junctions. Research cases are defined on the basis of variations in a (limited) number of behavioural characteristics and rules, the amount and composition of the traffic, the layout of the network and the ADAS penetration levels. Road safety effects are estimated by making use of derived indicators that have a (mostly qualitative) relation with crashes.

Core data is mainly used in macroscopic models. These models calculate the traffic flow in terms of aggregated variables like intensities and the average speed of streams of traffic. An increasing accuracy of microscopic models and APMs creates interesting possibilities to include detailed road safety knowledge in the core data.

For the impact assessment of in-vehicle ADAS, dynamic, microscopic traffic models are especially worthwhile in combination with other methods like driving simulator study and field operational tests (FOT). When effects caused by changes in surroundings are excluded, the models can give an estimation of the effects of individual measures or developments, and the susceptibility of the model's results to specific variables or conditions. It is possible to also look at the effects at a local level as well as at the network level, also in relation with data that are difficult to obtain empirically. Road safety can also be studied together with other targets in traffic and transport policy, like e.g. efficiency or the environment. Furthermore, software applications often have good visualisation facilities.

An important reservation is the limited amount of specific road safety information in the present traffic models. To a large extent this is the case because historically traffic models were not developed from a road safety point of view. This becomes evident in the design and quality of behavioural models for individual road users. In addition, derived indicators are necessary due to a lack of relevant static crash data. Then there is also a lack of clarity about the form of the causal relations between crashes and

widely used indicators, like time-to-collision (TTC). It must be said that other methods of ADAS impact assessment also have this problem. Therefore, although the use of these indicators is not useful in a quantitative sense, it is sensible in a qualitative sense, provided that the vehicle movements are modelled sufficiently accurately.

For both the impact assessment as well as the core data applications, traffic models are considered useful for ex ante evaluations, in which the safety effects of sets of measures or alternative system designs are compared. The results must be considered qualitatively and at an aggregated level. They can then indicate the direction for follow-up research and give support to the decision-making process at an early stage.

In the somewhat longer term, with increasing knowledge on the subject of road safety and traffic modelling, the models could give a more quantitative prediction of crashes. Points of special interest are the modelling of human traffic behaviour, both with and without ADAS, and the validation of safety indicators.



# Inhoud

<b>1. Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1. Achtergrond	9
1.2. Doel en methode	10
1.3. Rapportopbouw	10
<b>2. State-of-the-art van verkeersmodellen</b>	<b>11</b>
2.1. Categorisering van verkeersmodellen	11
2.1.1. Statische verkeersmodellen	11
2.1.2. Dynamische modellen	13
2.1.3. Indeling naar toepassingsgebied	14
2.2. In- en uitvoer	14
2.2.1. Invoer	15
2.2.2. Uitvoer	16
2.3. Historische ontwikkeling	16
2.4. Recente ontwikkelingen	18
2.4.1. Datafusie en dataverrijking	18
2.4.2. Instrumentontwikkeling	19
2.4.3. Hybride modellen	19
2.4.4. Externe ingang en gedragsmodellen in microscopische modellen	19
2.4.5. Verschuiving van toepassingsgebieden	20
2.4.6. Computercapaciteit	21
2.5. Samenhang beleidsvelden	21
<b>3. Huidige verkeersveiligheidstoepassingen</b>	<b>22</b>
3.1. Modelleren van verkeersveiligheidsmaatregelen (invoer)	22
3.1.1. Bestuderen van verkeersveiligheidseffecten	22
3.1.2. Bestuderen van afwikkelingseffecten	25
3.2. Schatting van veiligheidseffecten van maatregelen (uitvoer)	25
3.2.1. Kencijfers	26
3.2.2. Afgeleide indicatoren	27
3.3. Aandachtspunten en initiatieven voor de verbetering van verkeersmodellen	29
3.3.1. Gedragsmodellen	29
3.3.2. Afgeleide indicatoren	32
<b>4. Aansluiting bij onderzoek naar verkeersveiligheid</b>	<b>34</b>
4.1. Uitgangspositie van verkeersveiligheidsonderzoek	34
4.1.1. Piramidemodel	34
4.1.2. Accident prediction models (APM's)	36
4.1.3. De positie van verkeersmodellen	37
4.1.4. Basishouding	39
4.2. Relevantie op korte termijn	40
4.2.1. 'Impact assessment' van ADAS	40
4.2.2. Koppeling kencijfers en APM's	41
4.3. Relevantie op langere termijn	42
4.3.1. Bestuurdersmodellen	42
4.3.2. Onderzoek naar nieuwe indicatoren	44
4.3.3. Hybride modellen	44

<b>5. Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>46</b>
5.1. Conclusies	46
5.2. Aanbevelingen	47
<b>Literatuur</b>	<b>49</b>
<b>Bijlage</b>	<b>Begrippenlijst</b>
	<b>57</b>

# 1. Inleiding

## 1.1. Achtergrond

In het onderzoek naar verkeersveiligheid worden regelmatig modellen gebruikt, bijvoorbeeld voor trendanalyses van de verkeersveiligheid in het algemeen en van specifieke ongevalstypen (Reurings & Commandeur, 2007). Statistische ongevalsgegevens staan over het algemeen aan de basis van deze modellen. De modellen worden daarbij ingezet als een instrument om de effectiviteit van genomen maatregelen te onderzoeken, en om kansrijke richtingen voor nieuwe maatregelen te identificeren.

Onderzoek waarbij gebruik wordt gemaakt van verkeersmodellen is relatief nieuw in het werkveld van de verkeersveiligheid. Het gaat daarbij met name om dynamische verkeersmodellen, die de verkeersafwikkeling beschrijven op het niveau van verkeersstromen en voertuigbewegingen. Deze modellen geven een wiskundige beschrijving van het verkeer, gericht op het verwerven van inzicht in verkeerskundige problemen en prestaties van het verkeerssysteem. Met dat inzicht kunnen effecten van maatregelen worden geschat en kunnen aanbevelingen worden gedaan ter ondersteuning van beleidsbeslissingen. Het gaat daarbij bijvoorbeeld om het ontwerp van het wegennet, aanpassing van de infrastructuur, of de toepassing van technologie, en de effecten die dat heeft op bereikbaarheid, leefbaarheid en verkeersveiligheid. Onder meer in het kader van onderzoek naar routekeuze is recent ervaring opgedaan met het toepassen van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek (Morsink et al., 2004; Dijkstra & Drolenga, 2007).

Traditioneel zijn vooral infrastructurele en verkeersmanagementmaatregelen onderwerp van studies met verkeersmodellen. De laatste jaren komen verkeersmodellen ook steeds meer in beeld voor het schatten van de effecten van verschillende soorten Intelligente Transportsystemen (ITS), zoals bestuurdersondersteunende systemen (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS). In-voertuigsystemen, zoals Advanced Cruise Control (ACC) en de Intelligente Snelheidsassistent (ISA), zijn nog niet, of slechts mondjesmaat, in het huidige voertuigenpark doorgedrongen, maar door voortschrijdende ontwikkelingen kunnen ze een gunstige invloed hebben op verkeersveiligheid, milieu en doorstroming (Wegman & Aarts, 2005). Bij de meeste toepassingen van verkeersmodellen gaat het vooralsnog voornamelijk om het voorspellen van effecten op verkeersdoorstroming, bereikbaarheid en reistijden. Dat geldt ook voor toepassingen gericht op ITS en ADAS. Daarbij is er steeds meer aandacht voor milieuvraagstukken, en ook worden regelmatig uitspraken gedaan over verkeersveiligheidseffecten op basis van uitkomsten van verkeersmodellen.

De vraag is of verkeersmodellen ook een aantrekkelijk perspectief bieden voor het onderzoeken van toekomstscenario's wat betreft verkeersveiligheid, en de effecten van verschillende typen maatregelen daarbinnen. Om een antwoord op die vraag te kunnen geven, is het van belang een kader op te stellen voor het gebruik en de verdere ontwikkeling van de modellen voor verkeersveiligheidsonderzoek en voor advies dat op basis van dat onderzoek plaatsvindt.

## 1.2. Doel en methode

Dit rapport beschrijft een verkenning van de toepassingsmogelijkheden van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek. Het beoogt inzicht te geven in de mogelijkheden van verschillende typen verkeersmodellen. De nadruk ligt daarbij op vraagstukken rondom *impact assessment* van in-voertuig-ITS en ADAS. De verkenning beoogt ook richtingen aan te geven voor de verdere ontwikkeling van de modellen, om daarmee uiteindelijk de kwaliteit van de modellen als instrument voor verkeersveiligheidsonderzoek te kunnen verbeteren.

De informatie die in dit rapport is verwerkt, is verkregen uit een literatuuronderzoek en uit interviews met deskundigen. Naar aanleiding van de literatuur zijn vragen geformuleerd in een startnotitie, op basis waarvan de interviews hebben plaatsgevonden. De studie is uitgevoerd in samenwerking met Goudappel Coffeng (ir. L.J.J. Wismans). De volgende deskundigen zijn geïnterviewd: prof. dr. ir. M.F.A.M. van Maarseveen (Universiteit Twente), prof. dr. ir. B. van Arem (Universiteit Twente/TNO), prof. dr. ir. S.P. Hoogendoorn (TU Delft), prof. ir. B. Immers (KU Leuven/TNO), ir. H.L. Tromp (Goudappel Coffeng), en ing. G. Schermers (AVV, thans SWOV). Zij worden allen hartelijk bedankt voor hun medewerking.

## 1.3. Rapportopbouw

Het rapport is als volgt opgebouwd. *Hoofdstuk 2* beschrijft de state-of-the-art van verschillende typen verkeersmodellen. Het geeft inzicht in historische en recente ontwikkelingen en de opbouw van de modellen. *Hoofdstuk 3* beschrijft op basis van de literatuur huidige verkeersveiligheidstoepassingen van verkeersmodellen en de problemen/beperkingen die men daarbij tegenkomt. *Hoofdstuk 4* beschrijft aandachtspunten en behoeften binnen het verkeersveiligheidsonderzoek en geeft een indruk van interessante, kansrijke richtingen voor verdere ontwikkelingen op de kortere en langere termijn. Het rapport wordt afgesloten met conclusies in *hoofdstuk 5*. De belangrijkste afkortingen en begrippen staan in de *Bijlage*.

## 2. State-of-the-art van verkeersmodellen

Verkeersmodellen zijn ontstaan vanuit de behoefte om inzicht te krijgen in de effecten van mogelijke toekomstscenario's op het verkeers- en vervoerssysteem. Zo worden verkeersmodellen gebruikt bij het opstellen van beleidsplannen, waarin ze effectschattingen geven van (combinaties van) specifieke verkeerskundige maatregelen, en helpen ze bij het voorspellen van de effecten van autonome ontwikkelingen op het verkeerssysteem, bijvoorbeeld veranderingen in de bevolkingsopbouw en de economie, (AVV, 2002a). De modellen beogen aan te tonen welke samenhang er is tussen verkeersstromen en het aanbod van infrastructuur en de verandering daarin, op basis van een totaalbeeld van het verkeer, ook al is er soms maar beperkte informatie beschikbaar (NM magazine, 2007).

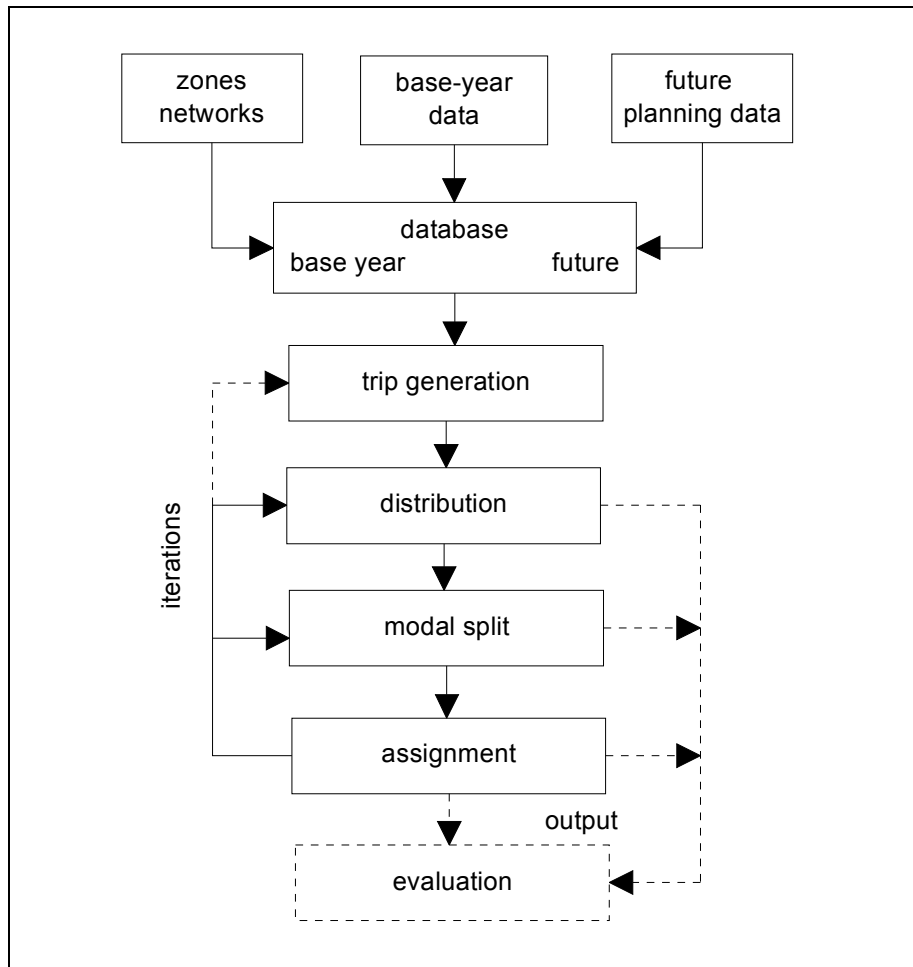
De bestaande verkeersmodellen zijn op verschillende manieren in te delen, zoals in *Paragraaf 2.1* wordt toegelicht. *Paragraaf 2.2* gaat verder in op de opbouw van de modellen in termen van invoer en uitvoer. *Paragraaf 2.3* geeft een overzicht van de historische, en *Paragraaf 2.4* van de recente ontwikkelingen van verschillende typen modellen. *Paragraaf 2.5* geeft een overzicht van de samenhang van de beleidsvelden.

### 2.1. Categorisering van verkeersmodellen

De meest grove en vaak toegepaste manier om verkeersmodellen te categoriseren, is op basis van de gebruikte *toedelingstechniek* van het verkeer aan het gemodelleerde wegennet. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen statische en dynamische modellen. Afhankelijk van het detailniveau worden dynamische modellen onderverdeeld in macroscopische, mesoscopische en microscopische modellen (Katholieke Universiteit Leuven, 1998; Wismans, 2003). Daarnaast wordt ook vaak een indeling op basis van het *toepassingsgebied* gehanteerd. Afhankelijk van de toepassingstermijn wordt daarbij onderscheid gemaakt in strategische, tactische en operationele modellen. De genoemde categorieën worden achtereenvolgens besproken.

#### 2.1.1. Statische verkeersmodellen

Statische modellen beschrijven de interactie tussen vraag en aanbod van infrastructuur, en veronderstellen dat vraag en aanbod constant zijn door de tijd heen. Statische verkeersmodellen zijn gebaseerd op het klassieke verkeersmodel, dat bestaat uit vier stappen (zie *Afbeelding 2.1*).



Afbeelding 2.1. Het klassieke verkeersmodel (Ortúzar & Willumsen, 1998).

De eerste stap ('trip generation') is de *bepaling van de productie en attractie*, waarbij bepaald wordt hoeveel verkeer er van een bepaalde locatie vertrekt en hoeveel verkeer op een bepaalde locatie wil aankomen.

De tweede stap ('distribution') is de *bepaling van de distributie*, waarbij de productie en attractie aan elkaar worden gekoppeld. Er wordt dus bepaald hoeveel verplaatsingen er zijn tussen locaties, vastgelegd in een Herkomst-Bestemmingsmatrix.

De derde stap ('modal split') bestaat uit de *bepaling van de modal split*, waarbij de verdeling van de verplaatsingen over de vervoerwijzen wordt bepaald. Deze eerst drie stappen worden al dan niet simultaan doorlopen. De laatste stap ('assignment') bestaat uit de *toedeling*, waarbij de routes van het verkeer worden bepaald over het netwerk. Bij het toedelen zijn er meerdere toedelingstechnieken mogelijk, zoals een Alles-Of-Niets-toedeling of een capaciteitsafhankelijke toedeling.

De uitkomsten van een statische toedeling bestaan uit prognoses van wegvakbelastingen, ofwel prognoses van verkeersstromen weergegeven in intensiteitenplots, of in intensiteit/capaciteit-ratio's. Er wordt geen rekening gehouden met dynamiek in de tijd, en het detailniveau is relatief laag.

### 2.1.2. *Dynamische modellen*

Dynamische modellen zijn tijdsbeschrijvende modellen, die rekening houden met veranderingen in de vraag naar en het aanbod van infrastructuur in de resulterende verkeersafwikkeling. De toestand op tijdstip  $t+1$  wordt daarbij berekend op basis van de toestand op tijdstip  $t$ . Dynamische modellen worden ook wel simulatiemodellen genoemd en kunnen verder worden onderverdeeld in macroscopische, mesoscopische en microscopische modellen.

#### *Macroscopische dynamische modellen*

In dit type model is de vraag naar infrastructuur de invoer voor het model. Het model berekent vervolgens de verkeersafwikkeling op wegvakniveau op basis van macroscopische relaties tussen de dichtheid en snelheid van het verkeer. Macroscopische modellen zijn meestal gebaseerd op vloeistofstroomtheorieën. Hierbij wordt de gehele verkeersstroom gesimuleerd als een vloeistofstroom die door een netwerk beweegt. De uitkomsten zijn prognoses van verkeersstromen per wegvak per tijdsinterval (intensiteiten, snelheden, etc.).

#### *Mesoscopische dynamische modellen*

Mesoscopische dynamische modellen beschrijven net als macroscopische modellen de verkeersstromen op een geaggregeerd niveau, maar maken ook gebruik van een algemene beschrijving van individueel gedrag als functie van macroscopische grootheden. Dit gedrag wordt niet per voertuig gespecificeerd, maar in stochastische grootheden die gelden voor een 'pakketje' voertuigen. Een inhaalmanoeuvre wordt bijvoorbeeld gemiddeld geïnitieerd door bepaalde dichtheden en snelheidsverschillen tussen de aangrenzende stroken. Voorbeelden van mesoscopische modellen zijn de zogenaamde 'headway distribution'-modellen, die de statistiek van het volggedrag beschrijven, en de gaskinetische modellen. Deze modellen worden in de praktijk nauwelijks toegepast.

#### *Microscopische dynamische modellen*

Microscopische dynamische modellen gaan uit van de kleinste eenheid, individuele voertuigen en verkeersdeelnemers, waarbij het verkeer op basis van gedragsregels wordt afgewikkeld over het wegennet. Ze zijn in eerste instantie ontwikkeld om lokale effecten te onderzoeken in kleine netwerken. De laatste jaren hebben deze modellen echter een grote ontwikkeling doorgemaakt, mede door de steeds grotere snelheid en capaciteit van computers. Microscopische modellen worden nu ook gebruikt voor netwerkstudies, waarbij gedisaggregeerde uitkomsten, zoals posities, snelheden en routes, per voertuig worden weergegeven als functie van de tijd.

In deze modellen worden de eigenschappen en gedragingen van verkeersdeelnemers, voertuigen en infrastructuurentiteiten gemodelleerd die bij elkaar opgeteld een totaalbeeld van het verkeer kunnen geven. De meeste modellen zijn gebaseerd op zowel de mechanische en functionele eigenschappen van voertuigen (en ingebouwde systemen) als het gedrag van de bestuurder. Bij gedrag gaat het hierbij met name om de modellering van routekeuzegedrag, rijstrookwisselgedrag, hiaatacceptatie en voertuigvolggedrag. De modellen bieden daarbij vaak de mogelijkheid om specifieke verdelingen van parameters behorend bij dit gedrag (bijvoorbeeld

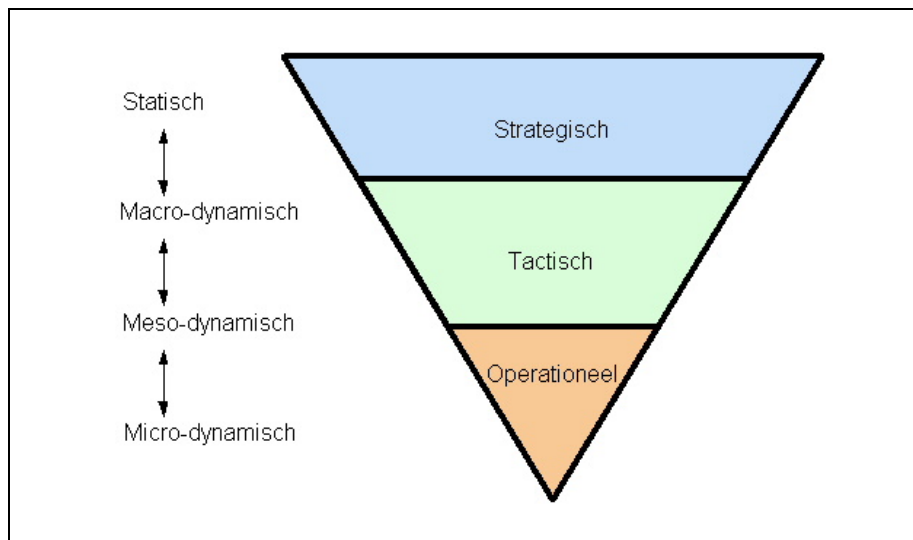
agressiviteit, bekendheid met het netwerk, hiaatacceptatie) over individuele verkeersdeelnemers (voertuig-bestuurdercombinaties) toe te passen.

Een ander relevant onderscheid in modellen is dat tussen *deterministische* en *stochastische* modellen. Bij deterministische modellen zullen herhaalde modelruns dezelfde uitkomst geven, terwijl de uitkomsten van stochastische modellen verschillen per run, omdat de instellingen van de invoerparameters worden bepaald met kansverdelingen. De meeste hier besproken modellen zijn stochastisch.

### 2.1.3. Indeling naar toepassingsgebied

Verkeersmodellen kunnen worden ingedeeld in modellen op strategisch, tactisch en operationeel niveau (zie *Afbeelding 2.2*). Overigens moeten deze niveaus niet worden verward met dezelfde terminologie die gebruikt wordt om verkeersgedrag te beschrijven.

De statische modellen worden vooral toegepast op het strategische niveau, waar langetermijnonderzoek wordt gedaan naar de effecten van maatregelen. De microscopische dynamische modellen worden vooral toegepast op het operationele niveau, waar voor de kortere termijn wordt gekeken naar de effecten van maatregelen op een hoog detailniveau. Macro- en mesoscopische dynamische modellen vallen hiertussen en bevinden zich meer vaker op het tactische niveau. Deze indelingen zijn niet scherp en er bestaat er een bepaalde mate van overlapping.



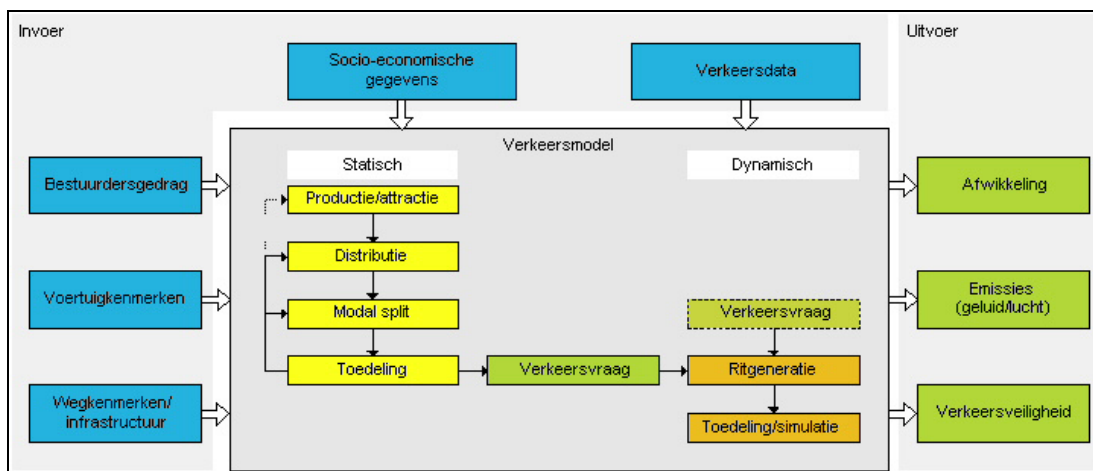
Afbeelding 2.2. Indeling naar toepassingsgebied.

## 2.2. In- en uitvoer

De opbouw van een verkeersmodel en de invoermogelijkheden die dat biedt, bepalen welke maatregelen met het model geëvalueerd kunnen worden. De uitvoer van het model wordt ten eerste bepaald door de grootheden die het directe resultaat van de berekeningen zijn (zoals intensiteit en snelheid), en ten tweede door de bewerkingen die daarop worden toegepast voor specifieke effectbepalingen (zoals effecten op verkeersveiligheid, leefbaarheid en bereikbaarheid). Microscopische modellen bieden de meest uitgebreide in- en uitvoer mogelijkheden. *Afbeelding 2.3* geeft een globaal



overzicht van de in- en uitvoer en de stappen die genomen moeten worden binnen verkeersmodellen (zie *Afbeelding 2.1*).



Afbeelding 2.3. Globaal beeld van de in- en uitvoer van verkeersmodellen en de stappen binnen verkeersmodellen.

### 2.2.1. Invoer

De linkerkant van *Afbeelding 2.3* laat de *modelinvoer* zien, die bestaat uit kenmerken van menselijk gedrag, voertuigen en infrastructuur. Het gedrag dat in de modellen wordt gemodelleerd, heeft bij microsimulatie bijvoorbeeld betrekking op routekeuze, het volgen van een voorganger, rijstrookwisseling en hiaatacceptatie. Voorbeelden van parameters die via specifieke verdelingen kunnen worden ingesteld, zijn de agressiviteit van een bestuurder of zijn bekendheid met het netwerk. Voertuigenmerken zijn bijvoorbeeld: afmetingen, massa, acceleratievermogen en maximum snelheid. In voorkomende gevallen kunnen bijvoorbeeld ook de functionele specificaties van ACC-systemen worden ingesteld.

Over het algemeen worden gedrags- en voertuigenmerken in combinatie met elkaar beschreven door met een beperkte serie parameters. Zo heeft een voertuigvolgmodel geen mogelijkheid om bestuurders- en voertuigeigenschappen eenduidig van elkaar te scheiden. Dit verlaagt de transparantie van de modellering en bemoeilijkt het toepassen van specifieke verdelingen over (op voorhand) onafhankelijke parameters die bestuurders en voertuigen representeren.

Daarnaast wordt de weginfrastructuur en bijbehorende wegkenmerken ingevoerd. Binnen statische modellen wordt de verkeersvraag (samenstelling van het verkeer, herkomsten en bestemmingen) bepaald op basis van de stappen van het eerder beschreven klassieke verkeersmodel (zie *Paragraaf 2.1.1*). Belangrijke invoer hiervoor is de indeling van een gebied in zones en de bij die zones behorende socio-economische gegevens zoals het aantal inwoners (eventueel uitgesplitst naar socio-demografische kenmerken), autobezit, aantal arbeidsplaatsen en aantal onderwijsvoorzieningen. Voor dynamische modellen geldt dat de dynamische verkeersvraag wordt ingevoerd. Deze wordt meestal gebaseerd op de verkeersvraag die is berekend met een statisch model en dan gedynamiseerd op basis van meetdata. De verkeersvraag kan echter ook

worden bepaald via andere methoden, zoals rechtstreeks op basis van meetdata en/of met behulp van een dynamische HB-schatter.

### 2.2.2. Uitvoer

De rechterkant van *Afbeelding 2.3* beschrijft de *modeluitvoer*, refererend aan de doelstellingen van de effectschattingen met het model. Het type uitvoer bepaalt welke verkeersveiligheidseffecten van de verkeersmaatregelen kunnen worden geschat. Verkeersmodellen simuleren geen ongevallen, en geven dus ook geen directe uitvoer daarover.

Vaak worden de effecten op de verkeersveiligheid beschreven met behulp van zogeheten 'afgeleide' of 'surrogate' indicatoren. Deze beschrijven conflict- of andere risicosituaties in het verkeer die voorafgaan aan ongevallen. Ze hebben vaak betrekking op risicovolle verkeersmanoeuvres, zoals weinig afstand houden en te hoge snelheid. Hoewel meer inzicht in de causale verbanden tussen deze indicatoren en werkelijke ongevallen nog steeds nodig is, worden ze in toenemende mate gebruikt voor effectschattingen. De zogeheten *time-to-collision* (TTC) is een bekend voorbeeld van zo'n indicator, maar ook de gemiddelde snelheid en snelheidsverdelingen worden in dit kader gebruikt. Deze maten winnen aan betekenis naarmate de relatie met werkelijke (letsel)ongevallen exacter beschreven is.

Andere uitvoerparameters die ook voor de verkeersveiligheid van belang zijn, hebben betrekking op expositie, zoals verkeersintensiteit, -dichtheid, de ratio intensiteit/capaciteit en de verdeling van het verkeer over het netwerk.. In combinatie met kencijfers (zie *Paragraaf 3.2.1*) worden de effecten op de verkeersveiligheid geschat. Kencijfers beschrijven het risico op een ongeval per afgelegde kilometer (of per passage, in het geval van kruispunten), en per wegtype. In de Regionale Benuttingsverkenner (RBV) is deze aanpak gehanteerd (SenterNovem, 2006).

Veel van de softwarepakketten waarmee verkeersmodellen worden gebouwd, kennen goede mogelijkheden voor visualisatie van de modeluitvoer. Hiermee kunnen complexe situaties op een beeldende manier inzichtelijk gemaakt worden, wat erg nuttig is bij de communicatie naar verschillende belanghebbenden in besluitvormingsprocessen (Poorterman et al., 2007).

In het volgende hoofdstuk wordt in meer detail ingegaan op enkele voorbeelden van uitvoermogelijkheden in de huidige toepassingen van verkeersmodellen voor verkeersveiligheid.

## 2.3. Historische ontwikkeling

De ontwikkeling van softwarepakketten voor verkeersmodellering is begonnen in de jaren '50 in de Verenigde Staten, waar omvangrijke modellen werden gebouwd van onder andere de steden Detroit en Chicago. In de jaren '60 breidde het gebruik van verkeersmodellen zich via Engeland uit over de rest van Europa. Dit waren alle statische verkeersmodellen. Doordat eind jaren '80 op initiatief van het ministerie van VROM alle Nederlandse gemeenten met meer dan 40.000 inwoners een Verkeers Milieu Kaart mochten ontwikkelen, ontstond er binnen Nederland een sterke groei van het aantal statische verkeersmodellen van gebieden. Rond deze tijd werden ook het Landelijk Model Systeem (LMS) en het Nieuw Regionaal

Model (NRM) ontwikkeld (Wismans, 2003). Dit heeft ertoe geleid dat heel Nederland nu is gemodelleerd in statische verkeersmodellen.

Deze statische verkeersmodellen worden van oorsprong vooral gebruikt om inzicht te krijgen in de wegvakbelastingen en bereikbaarheidseffecten. Daarnaast worden de uitkomsten van deze modellen gebruikt voor het bepalen van de effecten op luchtkwaliteit en geluidshinder. Deze prognoses spelen een belangrijke rol bij het vaststellen van het overheidsbeleid op deze terreinen.

De methodiek voor de toepassing van het NRM is vastgelegd in de Evaluatie Verkeer en Vervoer (EVV). In de EVV worden ook de effecten op de verkeersveiligheid bepaald (CROW, 1997; Poppe, 1995), maar de modellen worden hiervoor slechts beperkt gebruikt (via de combinatie van kencijfers en voertuigkilometers). Verkeersveiligheid wordt in deze aanpak meestal niet als een primaire doelstelling meegenomen, maar (hooguit) als randvoorwaarde.

In de jaren '80 is ook de ontwikkeling en toepassing van dynamische modellen in gang gezet, mede doordat de rekencapaciteit van computers toenam. In de periode van de jaren '90 tot nu is een sterke groei te zien in de ontwikkeling en toepassing van deze modellen. In 1997 werd binnen het Europese project SMARTTEST geschat dat het aantal softwarepakketten voor microsimulatie 58 bedroeg (SMARTTEST, 1997). Inmiddels zijn dit er ongetwijfeld meer.

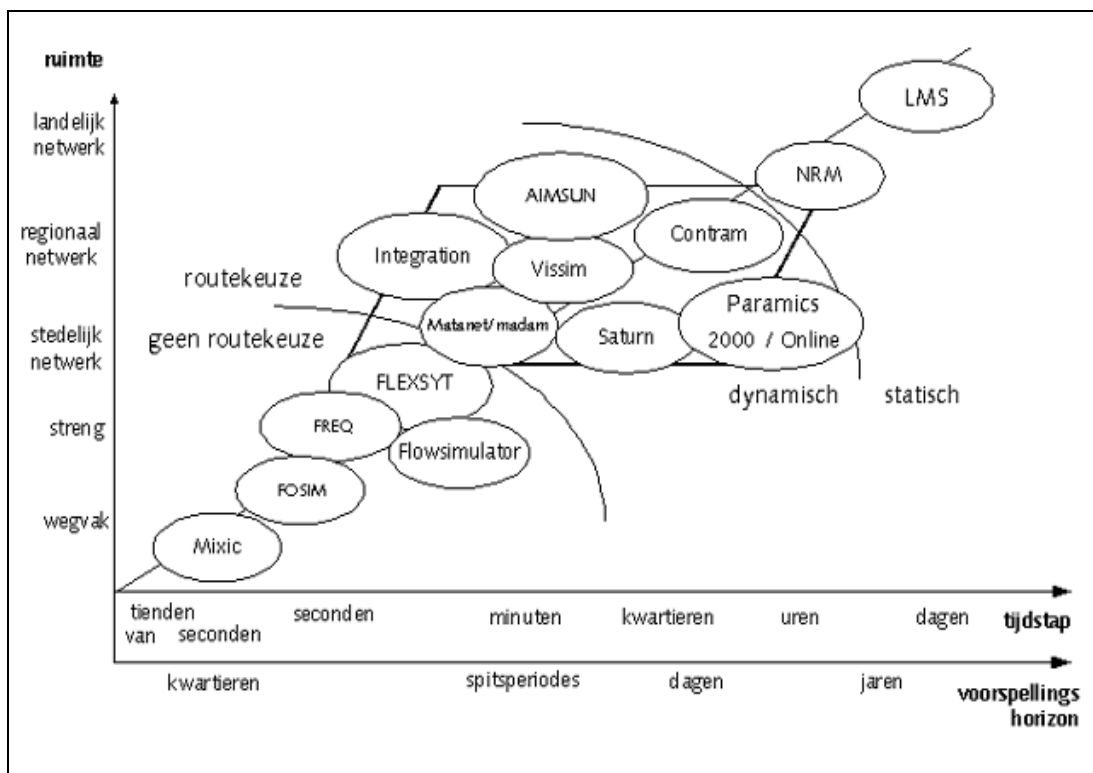
In Nederland wordt maar een deel van de wereldwijd bekende softwarepakketten gebruikt. AVV kent een 'leidraad modellen', die is opgesteld om informatie te geven over de modellen die in Nederland worden gebruikt. In *Afbeelding 2.4* staat een overzicht van (een groot deel van) deze programma's (AVV, 2002b). De afbeelding geeft een indruk van de toepassingsmogelijkheden van de verschillende pakketten.<sup>1</sup> Met betrekking tot de dynamische programma's die in Nederland worden toegepast, ontbreken in de afbeelding onder andere INDY, Metropolis, TRIPS dynamisch, Qblok, Dynaspart en Marple. Ook worden de programma's die voor de statische toedelingen worden gebruikt, niet met name genoemd. Het betreft hier pakketten als OmniTRANS, Questor en TRIPS.

De afbeelding geeft een indruk van de toepassingsmogelijkheden van de diverse pakketten, ondanks de aantekening<sup>2</sup>. Met betrekking tot de dynamische programma's die in Nederland worden toegepast, missen in de figuur o.a. nog INDY, Metropolis, TRIPS dynamisch, Qblok, Dynaspart en Marple. Ook worden de programma's die voor de statische toedelingen worden gebruikt, niet met naam genoemd. Het betreft hier pakketten als OmniTRANS, Questor en TRIPS.

---

<sup>1</sup> Aantal uitgezette variabelen op de assen is te groot en doet een aantal programma's tekort. Zo kennen de programma's AIMSUN, VISSIM, PARAMICS en INTEGRATION een rekentijdstapgrootte van 1 of minder dan 1 seconde.

<sup>2</sup> Aantal uitgezette variabelen op de assen is te groot en doet een aantal programma's tekort. Zo kennen de programma's AIMSUN, VISSIM, PARAMICS en INTEGRATION een rekentijdstapgrootte van 1 of minder dan 1 seconde.



Afbeelding 2.4. Indeling van in Nederland toegepaste programma's (AVV, 2002b).

## 2.4. Recente ontwikkelingen

Tegenwoordig worden verkeersmodellen door verkeerskundigen breed geaccepteerd als een veelzijdig instrument voor het verkrijgen van inzicht in het verkeerssysteem. De afgelopen jaren zijn er ontwikkelingen ingezet die mogelijk ook relevant zijn voor verkeersveiligheidsonderzoek.

### 2.4.1. Datafusie en dataverrijking

Er worden steeds meer toepassingen ontwikkeld waarin meetdata worden geïntegreerd met statische en dynamische modellen. Het doel van de deze integratie is datafusie en dataverrijking. Verschillende meetgegevens worden gecombineerd (datafusie), en ontbrekende gegevens worden geschat tot één samenhangende set (dataverrijking), waardoor de data wordt omgezet in bruikbare informatie. Voorbeelden zijn:

- OmniTRANS Real Time (RT), dat onder andere gebruikt wordt binnen Het Alkmaar Regelsysteem (HARS);
- OmniTRANS Inweva (Inschatten Wegvakintensiteiten), dat wordt gebruikt om op basis van data uit de Maandelijkse Telrapportage (MTR) een zo goed mogelijke inschatting te maken van de intensiteiten op het gehele Nederlandse hoofdwegennet;
- VISUM on-line, dat in Utrecht gebruikt wordt voor schatting van ontbrekende data op basis van teldata van verkeerslichten en AIMSUN NG (AVV, 2003).

Door deze nieuwe toepassingen kunnen de verkeersmodellen steeds beter gebruikt worden binnen anticiperende systemen om de verwachte situatie te

bepalen (voor de korte termijn) en/of toekomstscenario's door te rekenen. Voorbeelden zijn het gebruik van MaDAM binnen HARS en METANET binnen BOSS Off-line (AVV, 2006; Goudappel Coffeng, 2006).

De toepassing van datafusie en dataverrijking heeft mogelijk ook een interessante doorwerking binnen verkeersveiligheidsonderzoek. Als voorbeeld kan genoemd worden het complementeren en verrijken van snelheidsdata voor nader onderzoek naar het causale verband tussen ongevallen en snelheid.

#### 2.4.2. *Instrumentontwikkeling*

Om het gebruik van verkeersmodellen voor specifieke toepassingen mogelijk te maken, worden vanuit de modellen steeds meer aanvullende instrumenten ontwikkeld. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de zogeheten Duurzaamheidsmodule, een schil binnen OmniTRANS waarbij het macroscopisch dynamische model MaDAM wordt gebruikt om effecten van maatregelen op verkeersveiligheid, milieu, klimaat en bereikbaarheid te schatten. Een ander voorbeeld is de Regionale Benuttingsverkenner (RBV), waarbij het macroscopisch-dynamische model Marple gebruikt wordt om effecten van verkeersmanagementmaatregelen op verkeersafwikkeling te bepalen. In aanvulling hierop is er binnen de RBV een verkeersveiligheidsmodule ontwikkeld (zie ook *Paragraaf 3.2.1*).

Andere relevante voorbeelden zijn het Langzaam Rijden Gaat Sneller (LARGAS)-project en BOSS off-line, een (off-line) beslissingsondersteunend systeem voor regionale verkeersmanagementcentrales (SenterNovem, 2006; Klunder et al., 2006a; AVV, 2005). Hierbij worden de functionaliteiten van de verkeersmodellen voor de desbetreffende toepassing gebruikt en via een specifieke, aan de gebruiker aangepaste 'schil' aangeboden aan de gebruiker (AVV, 2004; SenterNovem, 2006).

Dergelijke ontwikkelingen maken het voor minder goed ingewijden makkelijker om de modellen te gebruiken voor een effectindicatie van bepaalde maatregelen. Bovendien sluiten deze ontwikkelingen aan bij de behoefte aan een integrale benadering bij effectanalyses, waarin ook veiligheid en milieu worden meegenomen.

#### 2.4.3. *Hybride modellen*

De ontwikkeling van zogeheten hybride modellen is gericht op het koppelen van verkeersmodellen op de verschillende niveaus (statisch, macroscopisch dynamisch en microscopisch dynamisch). Door deze koppeling kan een gebruiker een vraagstuk beschouwen op gedetailleerd en geaggregeerd niveau, en bijvoorbeeld een iteratieve wisselwerking tussen de niveaus bewerkstelligen. Voorbeelden hiervan zijn Aimsun Next Generation (NG), OmniTrans en VISUM (Barcelo et al., 2006). De ontwikkeling van hybride modellen is voornamelijk geïnitieerd vanuit het onderzoek naar problemen met verkeersafwikkeling.

#### 2.4.4. *Externe ingang en gedragsmodellen in microscopische modellen*

In het algemeen kan worden gesteld dat gebruikers van microscopisch-dynamische modellen steeds meer vrijheid krijgen om zelf modules te

ontwikkelen en aan het model te koppelen via een externe ingang. In tegenstelling tot de hierboven genoemde instrumenten kunnen gebruikers ingrijpen in de opzet en uitvoering van de simulatie. DVM-systemen (bijvoorbeeld verkeerslichten en toeritdosering) en ITS-systemen (bijvoorbeeld ADAS) kunnen zo gemodelleerd worden door in te grijpen in voertuigkenmerken, bestuurderskenmerken en wegkenmerken (Vogiatzis, N., 2003; Klunder, G. et al., 2006b). Als gevolg hiervan worden microscopische modellen steeds vaker uitgebreid met specifieke toepassingen. Hierbij kan gedacht worden aan parkeren (in- en uitgang van een parkeergarage en parkeren op parkeerterreinen), verkeersgeleiding en dynamische busstations. Ook verschillende vormen van ACC en ISA-systemen kunnen met een aantal pakketten worden gemodelleerd.

Het belang van een realistische modellering van verkeersgedrag wordt steeds meer door de ontwikkelaars onderkend. Die erkenning komt vooral door de stijgende behoefte aan microscopische modellen voor veiligheids- en milieutoepassingen, en de groeiende beschikbaarheid van gedetailleerde empirische data (Goswami & Bham, 2007; Hidas, 2002; Ben-Akiva et al. 2006; Antoniou et al. 2006; Frejinger & Bierlaire, 2006; Hogema, 2000). Deze vertalen zich in een uitbreiding van 'gedrags'-modellen zoals het routekeuzemodel, het voertuigvolgmodel en het rijstrookwisselmodel en in nieuwe ontwikkelingen op het gebied van vertrektijdstipkeuze en dynamische HB-schatters.

#### 2.4.5. *Verschuiving van toepassingsgebieden*

Er heeft de afgelopen jaren een verschuiving plaatsgevonden in de toepassingsgebieden (zie *Afbeelding 2.1*) van de verkeersmodellen. Voor het beleidsveld 'bereikbaarheid' is met name het gebruik van macroscopisch-dynamische modellen toegenomen. De reden hiervoor is dat macroscopische modellen de voordelen van statische modellen (onder andere een hogere rekensnelheid en een groter modelleerbaar netwerk) en microscopische dynamische modellen (onder andere tijdsafhankelijke en meer gedetailleerde verkeersafwikkeling) combineren. Deze ontwikkeling is in gang gezet door de behoefte aan geschikte verkeersmodellen op regionaal niveau ter ondersteuning van verkeersmanagement. Toepassing van microscopische dynamische modellen vergt relatief veel (reken)tijd, met name wanneer er een Monte Carlo-aanpak plaatsvindt, waarvoor meerdere modelruns nodig zijn om een statistisch betrouwbaar resultaat te verkrijgen. Bovendien biedt een microscopisch dynamisch model een hoger detailniveau dan op regionaal schaalniveau noodzakelijk is. Ook op het gebied van de verkeersveiligheid is er groeiende interesse in macroscopisch dynamische modellen, hoewel de mogelijkheden beperkter zijn dan van microscopische dynamische modellen. De ontwikkeling van de verkeersveiligheidsmodule voor de RBV is hier een voorbeeld van (AVV, 2005).

Bij microscopisch dynamische modellen is juist een verbreding zichtbaar in de toepassing. Dit komt onder ander door de reeds genoemde mogelijkheden om als gebruiker via een externe ingang een module te ontwikkelen en te koppelen aan deze modellen. Deze modellen worden dan ook steeds vaker gebruikt als onderzoeksinstrument ook voor verkeersveiligheid (Archer, 2005).

#### 2.4.6. Computercapaciteit

Er is een trend om steeds grotere verkeersnetwerken te modelleren. Voor grote netwerken kost het meer inspanning om een goedgekalibreerde model te maken. Daarnaast vragen vooral grote microscopische modellen veel computercapaciteit. Om de berekeningen te versnellen wordt daarom steeds meer gebruik gemaakt van meerdere parallelle processoren, zoals bijvoorbeeld in VISSIM (PTV Vision, 2005). Hoewel deskundigen geen grote problemen voorzien, is het nog niet helemaal duidelijk waar de werkbaarheidsgrens ligt van grote microscopische modellen. Dat is onder meer afhankelijk van de gewenste parametervariëaties in een model, het aantal benodigde runs binnen een Monte-Carloaanpak, en de ontwikkeling van de rekenkracht van de PC's die gebruikt worden voor deze simulaties. Daarnaast zal de ontwikkeling van de eerder genoemde hybride modellen mogelijk een gedoseerde toepassing van de micromodellen kunnen ondersteunen. Misschien spelen ook functionele beperkingen van grote netwerken in microsimulaties een rol; zogeheten 'grid locks' (vastlopen van het model) zouden kunnen optreden.

#### 2.5. Samenhang beleidsvelden

Het gebruik van verkeersmodellen is van oudsher gekoppeld aan beleidsvragen met betrekking tot de bereikbaarheid. Echter ook voor het bepalen van de effecten van de emissies door wegverkeer op wegvakniveau wordt sinds lange tijd gebruik gemaakt van (statische) verkeersmodellen. Daarnaast wordt binnen de Nota Mobiliteit (NoMo) nadrukkelijk gevraagd om een meer integrale benadering van verkeersproblemen en om studies waarbij aandacht dient te zijn voor afwikkeling, milieu en verkeersveiligheid. Ook op kleinere schaal is er groeiende aandacht voor de noodzaak van een integrale aanpak. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan toepassingen als Langzaam Rijden Gaat Sneller (LARGAS), Verkeersprestatie op Locatie (VPL), Gebiedsgericht Benutten (GGB) en de invoering van maatregelen als trajectcontrole en rekeningrijden.

Een beleidsveld dat goed vergelijkbaar is met verkeersveiligheid op het gebied van toepassing van verkeersmodellen en kwantificering van effecten is milieu. Het kwantificeren van de effecten van maatregelen op het gebied van emissies is van oudsher gekoppeld aan statische verkeersmodellen. Er wordt hierbij gebruikt gemaakt van emissiefactoren. Deze procedure kan vergeleken worden met het gebruik van risicocijfers in verkeersmodellen voor het schatten van verkeersveiligheid. Ook bij de milieutoepassingen is een ontwikkeling te zien waarbij effecten geschat worden met dynamische modellen, onder andere vanwege de steeds complexere maatregelen die zich richten op de dynamiek op individueel niveau en daarmee op bestuurdersgedrag en voertuigkenmerken. Het betreft hierbij zowel het kunnen simuleren van maatregelen (invoer) als het kunnen kwantificeren van de effecten (uitvoer). Ook hier speelt de noodzaak van een goede modellering van het bestuurdersgedrag (en van voertuigkenmerken). Een voorbeeld van een succesvolle toepassing is de studie 'Lucht voor 10!' (Goudappel Coffeng, 2004).

### 3. Huidige verkeersveiligheidstoepassingen

Dit hoofdstuk beschrijft in de literatuur gevonden toepassingen van verkeersmodellen binnen het werkveld van de verkeersveiligheid, en ervaringen/aandachtspunten die daarmee zijn opgedaan c.q. problemen die men daarbij is tegengekomen. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen de in- en uitvoerkant van de modellen, zoals in het voorgaande hoofdstuk is geïntroduceerd.

*Paragraaf 3.1* beschrijft toepassingen waarbij een specifieke verkeersveiligheidsmaatregel is gemodelleerd. Dit heeft een sterke connectie met de invoerkant van de modellen. *Paragraaf 3.2* beschrijft toepassingen waarbij de effecten van maatregelen op de verkeersveiligheid zijn geschat, op basis van de beschikbare uitvoermogelijkheden van het betreffende model. De nadruk ligt hier dus op de uitvoerkant van de modellen. Het gaat daarbij vaak om maatregelen die niet specifiek op verbetering van de verkeersveiligheid zijn gericht, maar waarin veiligheid als een randvoorwaarde wordt meegenomen. *Paragraaf 3.3* beschrijft vervolgens een serie initiatieven en aandachtspunten voor verbeteringen van verkeersmodellen, die mede volgen uit de eerder beschreven ervaringen.

#### 3.1. Modelling van verkeersveiligheidsmaatregelen (invoer)

In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op de toepassingen waarbij verkeersveiligheidsmaatregelen worden doorgerekend met een verkeersmodel en op de daaraan gekoppelde onderzoeken. Deze maatregelen richten zich op de traditionele invalshoeken: beïnvloeden van het bestuurdersgedrag, voertuigkenmerken en wegkenmerken. Veel maatregelen beïnvloeden meerdere elementen tegelijk. De introductie van ADAS, bijvoorbeeld, is een voertuigmaatregel die direct het bestuurdersgedrag beïnvloedt. Een duurzaam veilige weginrichting of de introductie van VMS (Variable Message Signs) zijn infrastructuurgebonden maatregelen met een directe interactie met bestuurdersgedrag. Overigens zien we in de literatuur een onderscheid tussen veiligheidsmaatregelen waarvan het effect op de veiligheid wordt bestudeerd (vaak samen met afwikkelingseffecten) en veiligheidsmaatregelen waarvan voornamelijk het effect op de verkeersafwikkeling onderwerp van studie is. De eerste groep is het meest interessant in het kader van dit rapport (3.1.1), maar de tweede groep komt volledigheidshalve ook aan de orde (3.1.2). Hoewel het in deze paragraaf vooral gaat om de invoer, wordt bij een aantal voorbeelden ook kort al iets over de uitvoer gezegd.

##### 3.1.1. Bestuderen van verkeersveiligheidseffecten

Met betrekking tot de invoer wordt binnen de recente literatuur veel aandacht besteed aan het modelleren van ADAS, infrastructurele maatregelen en verkeersmanagementmaatregelen, waaronder ITS-achtige. De meeste gerapporteerde toepassingen vragen een hoog detailniveau in de modellering, dat vrijwel alleen met microsimulatiemodellen te behalen is. Het hoge detailniveau betreft de functionaliteit van de systemen (bijvoorbeeld de algoritmieken van ADAS en dynamisch verkeersmanagement), het daaraan gerelateerde bestuurdersgedrag op het niveau



van individuele voertuigen en individuele bestuurders, en interacties tussen verkeersdeelnemers.

### 3.1.1.1. ADAS-toepassingen

In het Europese project CarTALK 2000 werd onderzoek gedaan naar effecten van ADAS op basis van voertuig-voertuigcommunicatie (Malone et al., 2003). Het microscopische simulatiepakket MIXIC is hiervoor gebruikt. Dit pakket beperkt zich tot toepassingen op het hoofdwegennet, maar heeft in tegenstelling tot andere pakketten wel een van elkaar losgekoppeld bestuurders- en voertuigmodel. In het voertuigmodel zijn specifieke voorzieningen getroffen voor de voertuig-voertuigcommunicatie-functionaliteit. Voor het schatten van verkeersveiligheidseffecten zijn veranderingen van TTC-waarden en schokgolven door de verkeersstroom bekeken.

MIXIC is tevens toegepast binnen de Nederlandse evaluatie van de Chauffeur Assistent (Schermers & Malone, 2004a en b). Deze Chauffeur Assistent bestaat uit een Lane Keeping System (LKS) en een Smart Distance Keeping system (SDK). Hierbij is op basis van een simulatorstudie bepaald wat de invloed van deze systemen is op het bestuurdersgedrag. Dit is vervolgens vertaald naar het simulatiemodel en toegepast om de effecten van deze systemen op de afwikkeling en verkeersveiligheid (TTC, schokgolven, snelheidsverschillen en volgafstanden) op een stuk snelweg te bepalen.

Louwerse & Hoogendoorn (2005), en Louwerse (2003) beschrijven een studie naar het effect van ISA op het onderliggend wegennet (OWN). Er werd gebruik gemaakt van VISSIM, dat de mogelijkheid heeft een gesloten ISA-variant te modelleren. De toepassing op het OWN was vernieuwend, omdat tot op heden voornamelijk effecten op het hoofdwegennet bestudeerd worden. Veiligheidseffecten werden geschat met de TTC, het aantal rijstrookwisselingen en de gemiddelde snelheid. Ook gebruikten zij de relatie van Nilsson (2004) om snelheidsveranderingen te vertalen naar wijzigingen van het ongevalsrisico.

Ma & Andreasson (2005) beschrijven een microsimulatieonderzoek om het effect te bepalen van verschillende penetratiegraden van ISA op de veiligheid van voetgangers. Hierbij is het simulatiemodel gekoppeld aan een voertuig-voetgangerbotsmodel. De door het simulatiemodel berekende snelheden en intensiteiten worden gelogd. Daarnaast is een hypothetisch voertuig-voetgangerbotsmodel ontwikkeld om twee veiligheidsindicatoren te schatten (kans op botsing en risico van dodelijk ongeval). Dit model en de data uit het simulatiemodel komen samen in een Monte-Carlosimulatie van conflicten tussen een voertuig en een voetganger, om de kans op een botsing en het risico van dodelijk ongeval voor de betreffende ISA-penetratiegraad te bepalen.

Binnen onderzoek naar de effecten van ACC-systemen in het kader van het Europese programma ADVISORS (Yannis et al., 2003) zijn met behulp van de microsimulatiepakketten SIMONE en SISTM en simulatoronderzoek de verkeers- en veiligheidseffecten van de introductie van ACC onderzocht (TTC, gemiddelde snelheid en volgafstanden). Het onderzoek toont de

meerwaarde aan van gecombineerd onderzoek met simulator (detaileffecten) en simulatie (netwerkeffect).

Naast deze voorbeelden, waarin simulatiestudies profiteren van simulatorstudies (Yannis et al., 2003; Schermers & Malone, 2004a en b), komt ook het omgekeerde voor. Onder andere door Olstam (2006) is een microsimulatiemodel gebruikt om de omringende voertuigen in een simulator te simuleren. De resultaten van onderzoek naar (verkeersveiligheids)maatregelen zijn vaak afhankelijk van de verkeerscondities, waarbij het van belang is dat binnen een simulator het omringende verkeer wordt meegenomen. Het gekoppelde simulatiemodel genereert het omringende verkeer op basis van een ingevoerde intensiteit en modelleert de interactie met het omringende verkeer. Het model is gebouwd op geaccepteerde technieken voor microscopische simulatie en simuleert alleen de dichtstbijzijnde omgeving van het simulatorvoertuig. Dit is nieuw ten opzichte van eerdere toepassingen zoals met AIMSUN en VISSIM, waarbij de gehele omgeving gesimuleerd diende te worden

### 3.1.1.2. Infrastructurele en verkeersmanagementtoepassingen

Dijkstra & Drolenga (2007) hebben het microsimulatiepakket PARAMICS toegepast voor onderzoek naar de veiligheidseffecten van routekeuze. Daaruit volgde onder meer dat het mogelijk was om met microsimulatie een ex-ante studie te doen naar veranderingen in routekeuze als gevolg van voorzieningen langs de weg of in voertuigen, en wat dat in kwalitatieve zin betekent voor veiligheid en reistijden. Vervolgonderzoek in dit kader richt zich op het beoordelen van de veiligheid van routes aan de hand van algemene en voertuigafhankelijke indicatoren (zie ook 3.2). In een eerder stadium van het onderzoek werd ook een variatie van snelheidslimieten op routekeuze bestudeerd, wat betreft veiligheidskarakteristieken en reistijden, met het microsimulatiepakket INTEGRATION (Morsink et al., 2004).

In twee andere studies met PARAMICS werd onderzoek verricht naar het effect op de doorstroming en veiligheid van variabele snelheidslimieten die gebruik maken van strategieën op basis van de *real-time*-ongevalskans. In het systeem wordt op basis van een on-lineschatter van de ongevalskans de maximumsnelheid aangepast, zodat de verkeersveiligheid wordt verhoogd (Lee et al., 2006). Voor het bepalen van de *real-time*ongevalskans is in eerder onderzoek door Abdel-Aty et al. een model geschat dat gebruik maakt van logistische regressie om on-lineverkeersdata, gemeten met meetlussen, te koppelen aan de kans op een ongeval (Abdel-Aty et al., 2006).

In onderzoek naar het management van de toegang van wegen (Eisele & Toycen, 2005) is met behulp van het microsimulatiepakket VISSIM het effect van verschillende toepassingen (zoals verhoogde middenbermen, opstelstroken, en verkeersregelingen) op de verkeersveiligheid (TTC en varianten daarop) bepaald.

In een studie met het microsimulatiepakket AIMSUN werden effecten bestudeerd van een driestroomsweg (één strook per rijrichting met een wisselhaalstrook, de zogeheten 1x2+1-variant) in vergelijking met een traditionele tweebaansweg met inhaalmogelijkheid (CROW, 2006). Er werd met name gekeken naar veranderingen in inhaalgedrag in relatie tot

verkeersveiligheid en reistijd. In de simulaties werden zaken als de lengte van de inhaalstrook, de intensiteit en samenstelling van het verkeer en verkeersmaatregelen (snelheidslimieten, inhaalverboden) gevarieerd.

### 3.1.2. *Bestuderen van afwikkelingseffecten*

Zoals eerder beschreven zijn veel verkeersmodellen oorspronkelijk ontwikkeld om inzicht te geven in de effecten van maatregelen op wegvakbelastingen en afwikkeling. Binnen de toepassingen op het gebied van verkeersveiligheid ligt nog vaak de nadruk op het kunnen modelleren van de effecten van verkeersveiligheidsmaatregelen op de verkeersafwikkeling.

Binnen alle statische modellen en macroscopische dynamische modellen worden impliciet de effecten van met name infrastructuurgebonden maatregelen meegenomen die van invloed zijn op de routekeuze en afwikkeling van het verkeer en daarmee op de wegvakbelastingen. Voor microscopische dynamische modellen geldt dit ook. Doordat echter de maatregelen steeds complexer worden door technologische innovatie (zoals ITS-systemen) en steeds vaker voertuiggebonden zijn, worden deze modellen steeds vaker expliciet toegepast om de effecten van deze maatregelen door te rekenen.

Zo is binnen onderzoek van Hegeman (2000) het effect van ISA op de doorstroming bepaald met behulp van het microsimulatiepakket INTEGRATION. Binnen verschillende onderzoeken van Golias et al. (2001) is het effect van ADAS op de afwikkeling op het onderliggende wegennet bepaald. Binnen onderzoek van Visser (2005) en De Jong (2004) is het effect van coöperatieve ACC (ACC met voertuig-voertuigcommunicatie) bepaald op de afwikkeling op snelwegen met behulp van het microsimulatiepakket MIXIC.

Hogema et al. (2000) voerden een verkennende microsimulatie studie uit met MIXIC naar de effecten van ISA in een lane-dropsituatie (van drie naar twee rijstroken) op een snelweg: minder snelheidsvariaties en een homogener verkeersstroom Ook werd geconstateerd dat men rijstrookwisselgedrag en hiaatacceptatiegedrag nog onvoldoende goed kon modelleren, overigens mede door een gebrek aan kennis over verkeersgedrag van bestuurders met ISA. Dit manifesteerde zich in relatief veel foutieve invoegmanoeuvres en een verlaging van de capaciteit ter plaatse van de bottleneck.

### 3.2. **Schatting van veiligheidseffecten van maatregelen (uitvoer)**

Bij de uitvoer gaat het om methoden/indicatoren waarmee de effecten van maatregelen op de verkeersveiligheid worden beschreven op basis van berekeningen met een verkeersmodel. Dit onderwerp kent een sterke relatie met het schatten van verkeersveiligheid op basis van empirisch gemeten data en andere onderzoeksmethoden. Aandacht voor de uitvoerkant van de modellen bestaat al langer dan voor de eerder besproken invoerkant.

De meest directe indicatoren om verkeersveiligheid te beschrijven hebben betrekking op letselongevallen. Binnen een verkeersmodel kunnen zich echter geen ongevallen voordoen (de volgmodellen en

voertuigeigenschappen zijn dusdanig, dat voertuigen niet zullen botsen). Daarbij wordt het modelleren van ongevallen ook niet erg zinvol en werkbaar geacht in verband met de veelzijdige toedracht van ongevallen en hun onvoorspelbare karakter. Hierdoor is het zeer complex om het optreden van een ongeval op een bepaalde plek, op een bepaald tijdstip, met een bepaalde bestuurder en in bepaalde omstandigheden aan één of meerdere specifieke condities te koppelen die in een verkeersmodel kunnen worden gemodelleerd.

Er wordt daarom gebruik gemaakt van grofweg twee alternatieve methoden:

- kencijfers (3.2.1);
- afgeleide (of surrogate) indicatoren (3.2.2).

In beide gevallen gaat het om het kunnen onderscheiden van meer en minder risicovolle situaties. Modelberekeningen met variaties van de meest relevante parameters zouden dan tot een optimalisatie van de verkeersveiligheid leiden.

### 3.2.1. *Kencijfers*

Kencijfers (ook wel risicocijfers genoemd) zijn gebaseerd op statistische gegevens en meten slachtoffers of letselongevallen af aan een expositiemaat (veiligheid = risico x expositie). Voor verschillende wegtypen is de expositiemaat bij voorkeur het aantal voertuigkilometers, bij kruispunten het aantal passages. Bij gebruik van verkeersmodellen ligt de nadruk meestal op het prognosticeren van de verschillen in het gebruik/expositie van de verschillende wegtypen en daarmee de verkeersveiligheid.

Om de verkeersveiligheid in te schatten berekent het verkeersmodel het aantal voertuigkilometers per wegtype. Deze uitkomsten worden vervolgens gekoppeld aan de kencijfers per wegtype om het aantal slachtoffers en letselongevallen te berekenen. In statische en macroscopische dynamische verkeersmodellen worden veelal kencijfers in letselongevallen per miljoen voertuigkilometers gebruikt.

Zo gebruiken de Duurzaamheidsmodule en de Regionale Benuttingsverkenner (RBV, zie ook 2.4.2) dezelfde methode. Kencijfers per wegtype (op basis van Janssen, 2005) en wegvakbelastingen, berekend door het model, resulteren in schattingen van slachtofferaantallen. Beide bovenstaande methodes richten zich op de verschillen in uitkomsten van meerdere modelvarianten en niet op de absolute uitkomsten van het model.

De studies van Immers et al. (2001) en Dijkstra & Hummel (2004) beschrijven een interessante toepassing van kencijfers in combinatie met een macroscopisch dynamisch model. Verschillende met elkaar concurrerende netwerkconfiguraties worden daarin bestudeerd vanuit het oogpunt van doorstroming en verkeersveiligheid.

Vanuit een wat andere invalshoek gebruikt Zantema (2007) het macroscopisch dynamische pakket INDY voor het bestuderen van verkeersveiligheidseffecten op netwerkniveau als gevolg van verschillende strategieën van 'verzekeren per kilometer'. Veranderingen in het gebruik van wegtypen in combinatie met kencijfers, aangevuld met een ophogingsfactor voor nachtelijk rijden, gebruikt hij voor een kwalitatieve vergelijking van die strategieën.

Daarnaast zijn er enkele toepassingen waarbij relaties zijn gebruikt tussen kencijfers en etmaalintensiteiten. Dit introduceert een vorm van dynamiek in de vooralsnog overwegend statische (constante) kencijfers per weg. Ook verschillen de toepassingen waarbij kencijfers worden gebruikt in het aantal wegtypen dat wordt onderscheiden en in detaillering door ook kruispunttypen te onderscheiden.

### 3.2.2. Afgeleide indicatoren

#### 3.2.2.1. Achtergrond

Zoals in 2.2.2 al is aangegeven, beschrijven afgeleide indicatoren conflicten of andere risicosituaties in het verkeer die voorafgaan aan ongevallen. Deze ontwikkeling is in de jaren zestig begonnen met Perkins en Harris, die een maat zochten die de schaarse, vaak onvolledige of niet beschikbare ongevalldata kon vervangen (Eisele & Toyce, 2005; AVV, 2004). Archer (2001) geeft aan dat de afgeleide maten vanuit een empirische benadering voordelen bieden. Door te focussen op maten die de kwantiteit en kwaliteit van weggebruikersgedrag en interactie meten, kan een betere indicatie van veiligheidsniveaus verkregen worden. Bovendien komen de betreffende risicosituaties in het verkeer vaker voor dan daadwerkelijke ongevallen, waardoor een kortere monitoringperiode volstaat om tot stabiele statistische waarden te komen. Dit argument speelt ook een rol bij de ontwikkeling van conflictobservatietechnieken als DOCTOR en de Swedish Traffic Conflict Techniek (Archer, 2001).

Afgeleide maten worden zowel in dynamische als statische modellen gebruikt. De dynamische, en zeker de microscopische, gebruiken meer indicatoren, hetgeen mogelijk is doordat deze modellen veel meer informatie genereren over de afwikkeling van het verkeer (snelheden en snelheidsverdelingen) en de interactie tussen voertuigen. Een uitgebreid overzicht van deze maten is te vinden in het literatuuronderzoek van Gettman & Head (2003) naar surrogate veiligheidsindicatoren voor simulatiemodellen, in literatuuronderzoek naar veiligheidsindicatoren voor routes en HB-relaties (Drolenga, 2005), in onderzoek naar indicatoren voor verkeersveiligheid (Archer, 2005) en in literatuuronderzoek van de AVV naar veiligheidsindicatoren voor toepassing binnen de verkeersveiligheidsmodule van de Regionale Benuttingsverkenner (AVV, 2004).

#### 3.2.2.2. Time-to-Collision en aanverwante indicatoren

De bekendste afgeleide indicator is de Time-To-Collision (TTC). Van twee voertuigen die op botskoers liggen, geeft deze indicator de verwachte tijd tot een eventuele botsing, als zij beide dezelfde snelheid en koers aanhouden. Het aantal kleine (kritieke) TTC's wordt vervolgens gebruikt als maat voor verkeersveiligheid. Enkele voorbeelden van toepassingen zijn al genoemd.

Er bestaan diverse variaties op de TTC. Zo is er de maat Number Of Conflicts (NOC) waarbij het aantal conflicten in een simulatie wordt vastgesteld. Een conflict wordt als zodanig geteld als een TTC beneden de kritieke waarde ten minste eenmaal tijdens de duur van de interactie tussen twee voertuigen wordt waargenomen (Gettman & Head, 2003). De NOC telt een conflict tussen twee voertuigen, die op meerdere momenten een TTC beneden de kritieke waarde hebben (deze wordt immers iedere rekentijdstap

van het model bepaald) slechts eenmaal. Minderhoud & Bovy (2001) introduceren de Time Integrated Time to collision (TIT) en de Time Exposed Time to collision (TET). Bij de TIT wordt rekening gehouden met de tijdsduur en waarde van de TTC's beneden de kritieke waarde. Bij de TET wordt de totale tijd gesommeerd, waarin de TTC de kritieke waarde heeft overschreden.

Ander maten die worden gebruikt en die sterk samenhangen met TTC zijn:

- Gap Time (GT): tijd tussen het oprijden van een afslaand voertuig en het moment dat het kruisende voertuig op het conflictpunt arriveert.
- Encroachment Time (ET): tijdsduur gedurende welke het afslaande voertuig een conflict heeft met het voertuig dat voorrang heeft.
- Post-Encroachment Time (PET): tijd tussen het eind van oprijden van afslaand voertuig en het moment dat het voertuig dat voorrang heeft, daadwerkelijk op het conflictpunt arriveert.
- Initially Attempted Post-Encroachment Time (IAPT); tijd tussen het begin van het oprijden van een afslaand voertuig en de verwachte tijd dat het rechtdoorgaande voertuig het conflictpunt bereikt.
- Time Headway en Distance Headway: volgtijd en volgafstand tussen een voertuig en zijn voorligger.
- Unsafety Density: optelsom van potentiële botsingen wanneer een zich stroomafwaarts bevindend voertuig maximaal zal afremmen en het volgend voertuig zal reageren met een standaard reactietijd (2 seconden).
- Deceleration Rate (DR): mate waarin een kruisend voertuig moet afremmen om een botsing te voorkomen. Zie Morsink et al. (2003) voor de indicator Minimum Necessary Deceleration Rate, die de benodigde remvertragingen ten opzicht van meerdere voorgangers vastlegt.
- Proportion of Stopping Distance (PSD): quotiënt van de beschikbare afstand met de overgebleven afstand tot het potentiële botspunt

### 3.2.2.3. Andere afgeleide indicatoren

Naast de 'TTC-achtige' indicatoren worden ook indicatoren gebruikt met een hoger abstractieniveau of indicatoren die een indicatie leveren voor een specifieke locatie. Sommige van deze indicatoren worden vooral gebruikt wanneer de voertuiginteractie en de gedragsmodellen binnen het verkeersmodel niet geschikt zijn om op detailniveau verkeersveiligheidseffecten te beschrijven (SMARTTEST, 1997). Voorbeelden van deze indicatoren zijn (Archer, 2005; AVV, 2004):

- percentage stops (bewegingen waarbij tot stilstand wordt afgeremd);
- wachtrijlengtes;
- aantal roodlichtnegaties;
- percentage voertuigen dat links afslaat;
- snelheidsverdeling;
- vertragingverdeling;
- level of safety;
- schokgolven.

De meeste van deze indicatoren spreken voor zich, maar de *vertragingverdeling* en *level of safety* behoeven nadere uitleg.

Bij vertragingverdeling gaat het om de mate waarin de vertraging (tijdsverlies) van voertuigen is verdeeld over tijd (en plaats). Indien de

vertraging redelijk sterke pieken kent in de tijd, betekent dit een grote variatie in wachtrijlengtes, waardoor de kans op bijvoorbeeld kop-staartbotsingen groter wordt.

De 'level of safety' is een maat die is ontwikkeld door diverse onderzoekers met als doel het niveau van onveiligheid in te schatten op basis van afgeleide maten. Hierbij wordt de mate van onveiligheid ingedeeld in klassen. Song et al. (2005) hebben bijvoorbeeld het niveau van onveiligheid geschat op basis van een verband tussen snelheid en de veranderingen in het ongevalrisico.

#### 3.2.2.4. Specifieke indicatoren voor routekeuze

Dijkstra & Drolenga (2007) hebben specifieke indicatoren ontwikkeld voor onderzoek naar de verkeersveiligheid van routekeuze en wijzigingen daarin. Zij introduceren een zogeheten rutediagram, waarmee het Duurzaam Veilig-karakter van een route gevisualiseerd wordt. Aan de basis daarvan staan eigenschappen van routes die een sterke relatie hebben met verkeersveiligheid (bijvoorbeeld de lengte van de route, of het aantal en de typen overgangen tussen wegcategorieën).

### 3.3. Aandachtspunten en initiatieven voor de verbetering van verkeersmodellen

Binnen het Europese project SMARTTEST, dat eind jaren negentig is uitgevoerd, is een zo compleet mogelijk beeld geschetst van de beschikbare microsimulatiemodellen en hun toepassingsmogelijkheden (SMARTTEST, 1997). Dit beeld is gebruikt om te bepalen waar zich mogelijk hiaten voordeden en waar de modellen verder ontwikkeld zouden moeten worden. Met betrekking tot verkeersveiligheid werden er met name hiaten geconstateerd in *gedragsmodellen* en *indicatoren* bedoeld om doelen op het gebied van verkeersveiligheid te evalueren.

De afgelopen jaren is er wat dat betreft niet veel veranderd, ondanks een gestaag toenemende vraag naar microsimulatiemodellen, de toename van de rekensnelheden en capaciteit van computers, en de ontwikkeling van modelleertechnieken en datacollectietechnieken. Het onderzoek naar (vooral) gedragsmodellen is wel doorgegaan en dat heeft interessante inzichten opgeleverd. Daarom worden gedragsmodellen en verkeersveiligheidsindicatoren hier behandeld als belangrijkste richtingen voor de verbetering van de modellen. Relevante initiatieven worden besproken op basis van de beschikbare literatuur.

#### 3.3.1. *Gedragsmodellen*

##### 3.3.1.1. Uitgangssituatie

Gedragsmodellen binnen een microsimulatiemodel bestaan grofweg uit het modelleren van routekeuze, voertuigvolgedrag, hiaatacceptatie en rijstrookwisselgedrag. Microsimulatiemodellen kennen over het algemeen mogelijkheden voor variaties van gedrag tussen bestuurders. Zelden echter is er de mogelijkheid tot variatie binnen het gedrag van individuele bestuurders.

Daarnaast laat de transparantie van de modellen te wensen over, mede omdat menselijke gedragsvariaties en specifieke voertuig- cq. systeem-

instellingen nogal eens gecombineerd worden. Dit gebeurt via een beperkt aantal instelbare parameters in een soort gecombineerde voertuig-bestuurderentiteiten. Ook gedragen in een simulatie alle voertuig-bestuurdercombinaties zich op een 'veilige' manier, terwijl in de werkelijkheid bestuurders fouten maken waardoor onveilige situaties kunnen ontstaan. Aanbeveling die hieruit volgen, zijn dat het beter zou zijn om modellen voor bestuurders en voertuigen van elkaar te scheiden, en dat foutmechanismen in de gedragsmodellering opgenomen moeten worden.

De variatie tussen bestuurders gebeurt vaak door random sampling. Dat suggereert wel meer realisme maar is vaak arbitrair en niet erg significant voor de resultaten. Daarnaast is er twijfel over de consistentie in gedrag bij de verschillende distributies van variabelen (Jansen, 2005). Dit heeft geleid tot verschillende onderzoeken naar het beter geschikt maken van microsimulatie voor verkeersveiligheidstoepassingen.

Binnen onderzoek van Klunder et al. (2006b) wordt aangegeven dat het voor het goed modelleren van ITS-systemen van belang is om effecten op het bestuurdersgedrag mee te nemen. Hiervoor is een applicatie ontwikkeld, 'ITS-modeller' genaamd, die gekoppeld kan worden met verschillende bestaande microsimulatiepakketten. De huidige versie is vooralsnog alleen gekoppeld aan PARAMICS, waarbij men door middel van de beschikbare interface van de ITS-modeller in staat is om het voertuiggedrag in de simulatie tot op zekere hoogte aan te passen en te beheersen.

### 3.3.1.2. Conceptueel onderzoek

Bonsall et al. (2004) hebben onderzoek gedaan naar de parameters en aannames die betrekking hebben op aan veiligheid gerelateerd gedrag in simulatiemodellen. Op basis van testen met behulp van het simulatiepakket DRACULA wordt geconcludeerd dat het in het algemeen beter is om realistische-maar-onveilige waarden te gebruiken dan veilige-maar-onrealistische waarden, aangezien dit leidt tot een betere effectinschatting op de aspecten doorstroming en veiligheid. Hierbij moet aangetekend worden dat het gebruik van realistische-maar-onveilige waarden kan leiden tot de keuze voor onveilige ontwerpen, wanneer alleen op basis van doorstromingseffecten wordt beslist.

In het SINDI-project en het promotieonderzoek van Archer (2001; 2005) is onderzoek gedaan naar de veiligheidsproblemen van verschillende gebruikersgroepen in stedelijk gebied, het potentieel van ISA en snelheidwaarschuwingssystemen voor het verbeteren daarvan, en het gebruik van microsimulatie daarbij. In dit onderzoek is geconstateerd dat het bestuurdersgedrag noodzakelijkerwijs probabilistische 'error'-mechanismen bevat (een bestuurder maakt fouten). Om dit mee te nemen is het bestaande simulatiemodel HUTSIM aangepast, waarbij een modelaanpak is gebruikt die gebaseerd is op theorieën en modellen gerelateerd aan cognitieve informatieprocessen en 'human factors'-onderzoek. Dit heeft tot een gedragsmodel geleid waarbij op verschillende niveaus fouten kunnen worden gemaakt die kunnen leiden tot ongevallen. Deze uitbreiding van de gedragsmodellen met cognitieve modellen wordt ook wel de stap in de richting van *nanoscopische simulatiemodellen* genoemd.

Ook door Mori et al. (2006) is een specifiek simulatiemodel ontwikkeld voor het evalueren van verkeersveiligheidssystemen. Hiermee kan worden getest



of de systemen werken zoals ze zijn ontworpen en hoe goed ze dan werken (reductie van ongevallen). Er wordt onderscheid gemaakt in verschillende stadia van bestuurdersgedrag met betrekking tot 'menselijke fouten' die bepalend zijn voor ongevallen. Daartoe zijn drie bestuurdersmodellen ontwikkeld (situatieherkenning, situatiebeoordeling, uitvoering bestuurders-taken) waarbinnen fouten gemaakt kunnen worden. Binnen een simulatie kunnen daardoor daadwerkelijke ongevallen vóórkomen als gevolg van mogelijke fouten van bestuurders in deze drie bestuurdersmodellen. Op basis van empirische data over mogelijke fouten zijn de parameters voor de reproductie van de ongevallen gekozen. .

### 3.3.1.3. Empirisch onderzoek

Hogema (2000) heeft gewerkt aan de koppeling van rijnsimulator-experimenten aan de modellering in microsimulatiemodellen. Binnen deze studie is simulatoronderzoek verricht naar het gedrag bij naderingsmanoeuvres, met als doel fundamentele kennis te verzamelen op dit gebied zodat deze kan worden toegepast binnen de modellering.

Onderzoek van Hidas (2002) heeft zich gericht op rijstrookwisselgedrag/ hiaatacceptatie bij invoegers en op weefvakken in congestiesituaties, aangezien het bestuurdersgedrag in deze situatie niet realistisch genoeg werd gesimuleerd. Op basis van video-observatie is een driedeling gemaakt in bestuurdersgedrag en zijn modellen geschat die tot realistische resultaten leiden voor snelheid, hiaatacceptatie en conflictoplossing.

Onderzoek van Ben-Akiva (2006) borduurt hierop voort. Het betreft het verbeteren van de modellen voor rijstrookwisselgedrag en hiaatacceptatie. Binnen dit onderzoek ligt de nadruk op de heterogeniteit van de bestuurderspopulatie en op correlaties tussen de verschillende beslissingen die een enkele bestuurder maakt.

Goswami & Bham (2007) heeft onderzoek verricht naar de verbetering van de modellen voor hiaatacceptatie bij rijstrookwisselgedrag. Op basis van meetdata is een verbetering van het gedragsmodel voorgesteld die rekening houdt met wisselend gedrag, afhankelijk van de verschillende verkeersgeometrische en omgevingscondities en verschillend gedrag door dezelfde bestuurder.

Van Dijk (2008) heeft het hiaatacceptatiegedrag voor links afslaand verkeer op kruispunten onderzocht. Als eerste is in een conceptueel model beschreven welke factoren invloed hebben op dit gedrag (onder andere leeftijd, geslacht, snelheid, verkeersintensiteit, voertuig- en wegtype). Het meewegen van meerdere hiaten in de verkeerstroom bleek een zeer relevante maar vooralsnog onderbelichte factor in verkeersmodellen te zijn. Dit aspect is getest in een Multi-agent Real-time Simulatieomgeving (MARS). Na enige verdere ontwikkeling zou het aangepaste hiaatacceptatiemodel ook in de gangbare microsimulatiepakketten kunnen worden ingebracht.

Een belangrijk initiatief dat een aantal van de bovenstaande studies heeft mogelijk gemaakt en samenhangt met de verbetering van de gedragsmodellen, is het NGSIM-project (Next Generation Simulation), dat is opgestart door de Federal Highway Administration (FHWA). Het doel van het

programma is de ontwikkeling van open-source gedragsalgoritmen ter ondersteuning van microsimulatie. Binnen het project wordt het belang van data van goede kwaliteit (hoge mate van detail en precisie) voor de validatie en kalibratie van modellen benadrukt. Ook wordt aandacht besteed aan deze dataverzameling. Voor verschillende onderzoeken worden de binnen het NGSIM-project verzamelde data gebruikt (Ranjitkar et al., 2006).

In Engeland loopt een initiatief om op basis van voertuiggegevens uit het werkelijke verkeer (zogenoeten 'floating car'-data) de kalibratie en validatie van gedragsmodellen in microsimulaties te verbeteren (Tate et al., 2006). In Nederland is een soortgelijke ontwikkeling gaande waarbij plannen bestaan om mede in het kader van onderzoek naar de Rijk-assistent van Wegen naar de Toekomst (WnT) data te verzamelen voor een betere validatie en kalibratie van gedragsmodellen (Transumo, 2007).

#### 3.3.1.4. Kanttekening

De mogelijkheden om maatregelen die ingrijpen in bestuurdersgedrag, wegkenmerken en voertuigkenmerken te modelleren binnen simulatiemodellen wordt steeds groter doordat de commerciële softwarepakketten mogelijkheden bieden voor de gebruiker om via een externe ingang in te grijpen op deze aspecten. Echter, bij een groot deel van deze pakketten wordt de kern van de modellen (zoals bestuurdersgedrag) grotendeels afgeschermd (Vogiatzis, 2003). Dit betekent dat het bijvoorbeeld wel mogelijk is om in te grijpen in parameters van het gedragsmodel, maar dat het niet mogelijk is om het gedragsmodel zelf aan te passen.

Bij detailmodellering op micro- of zelfs nanoniveau is het van belang dat de uitkomsten op macroniveau (intensiteiten, volumes) correct blijven. Herkalibratie van de modellen zou nodig kunnen zijn om dit te garanderen. Ook kunnen specifieke, systeemafhankelijke fenomenen optreden waarmee in de modellering rekening moet worden gehouden. De stabiliteit van verkeersstromen met een groot aandeel ACC-voertuigen is daar een voorbeeld van (Yi & Horowitz, 2006).

#### 3.3.2. *Afgeleide indicatoren*

##### 3.3.2.1. Geschiktheid en validatie

Een eerste belangrijk aandachtspunt bij de afgeleide indicatoren is hun geschiktheid en validiteit. Allereerst kan gekeken worden naar de functionele geschiktheid van een indicator om een verkeersveiligheidsprobleem te beschrijven. Misschien moeten er vanuit specifieke verkeersveiligheidskennis nog andere indicatoren gezocht worden die op zichzelf of in combinatie met de bestaande indicatoren problemen beter beschrijven. Voor de al bekende afgeleide indicatoren geldt bijvoorbeeld dat deze maar beperkt rekening houden met de zwaarte van conflicten. Een kritieke TTC-waarde (quotient van het snelheidsverschil en de afstand tussen twee voertuigen) kan echter zowel bij hoge of lage snelheden optreden, wat veel verschil kan uitmaken voor de impact van een mogelijk ongeval. Door altijd de snelheid als losse indicator mee te nemen, neemt de geschiktheid van zo'n indicator toe. Deze kan verder verbeterd worden door ook massaverschillen tussen botspartners te verdisconteren, of de kinetische energie die in een conflict omgaat (afhankelijk van massa en snelheid van

botspartners). Dijkstra & Drolenga (2007) hebben dat gedaan met de indicator Potential Collision Energy (PCE). Nog een stap verder gaat het meenemen van incompatibiliteit (bijvoorbeeld tussen voertuigtypen of tussen auto en voetganger) als indicator. Hierbij gaat het niet alleen om massa-verschillen, maar ook om verschillen in geometrie en vervormbaarheid van constructies, die mede de beschermingsniveaus van botspartners bepalen.

Een ander voorbeeld van de beperkte geschiktheid van de huidige indicatoren is bumperkleven. Een korte volgfstand tot de voorganger resulteert niet in een lage TTC, terwijl die omlaag schiet bij slechts licht remmen door de voorganger. Door altijd de volgfstand ook als losse indicatoren mee te nemen, kan hier een verbetering optreden. Vogel (2003) gaat verder in op de relatie tussen volgfstanden en TTC.

Voor functioneel geschikte indicatoren is een statistisch betrouwbaar causaal verband met letselongevallen noodzakelijk voor een kwantificering van verkeersveiligheidseffecten. Validatie van de indicatoren moet daarom continu aandacht blijven krijgen. De lacunes die daar nog liggen, zijn onderwerp van veel lopend onderzoek, zie bijvoorbeeld Gettman & Pu (2006).

Aanvullingen op of verbeteringen van de traditionele conflictobservatiemethoden (Kraay & Van der Horst, 1986) zijn hiervoor misschien nodig. Ook in-voertuigdatacollectiemethoden, gekoppeld aan ITS-ontwikkelingen, zouden hier een belangrijke rol in kunnen krijgen.

#### 3.3.2.2. Nauwkeurigheid

Een tweede belangrijk aandachtspunt is de nauwkeurigheid waarmee voertuigbewegingen en interacties tussen voertuigen worden gemodelleerd. De afgeleide indicatoren beschrijven verkeersbewegingen op een gedetailleerde manier. Rariteiten zoals onrealistische bewegingen of manoeuvres moeten daarom worden voorkomen in het model. Met name de nauwkeurigheid van laterale bewegingen en het realiteitsgehalte van de verkeersafwikkeling op kruispunten dienen verbeterd te worden. Het laatste punt heeft ook een sterke relatie met bestuurdersmodellen. Studies van Archer (2005), Klunder et al. (2006a/b) en Schaap & Van Arem (2006) gaan hier verder op in.

## 4. Aansluiting bij onderzoek naar verkeersveiligheid

Uit de vorige twee hoofdstukken kunnen globaal twee conclusies getrokken worden.

*Ten eerste* is er een vrij brede behoefte aan verkeersmodellen waarin de verkeersveiligheid wordt meegenomen. In de meeste toepassingen is verkeersveiligheid onderwerp van studie samen met andere beleidsvelden. Wel is er een toename van toepassingen die specifiek gericht zijn op de verkeersveiligheid. Er zijn veel ontwikkelingen op het gebied van evaluatie van ITS en ADAS, waarbij vaak dynamische microsimulatie gebruikt wordt. Maar ook in bredere zin, waarbij de modellen in wisselwerking met empirische methoden worden gebruikt, is er de nodige activiteit.

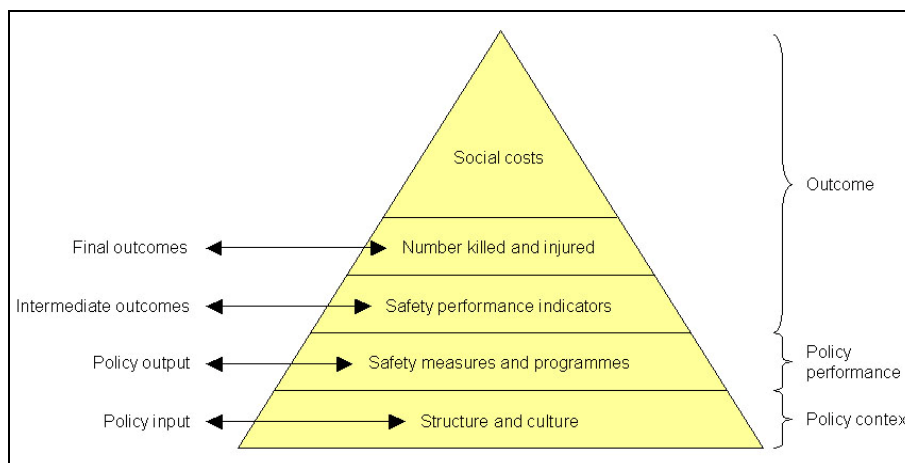
*Ten tweede* zijn de voor de verkeersveiligheid gebruikte modellen niet speciaal vanuit dat oogpunt ontwikkeld. Als gevolg daarvan is in de modellen weinig specifieke verkeersveiligheidskennis terug te vinden. Er liggen dus behoorlijk wat uitdagingen om de modellen te verbeteren op dat punt. Het gaat daarbij vooral om de opzet en validatie van gedragsmodellen en indicatoren voor verkeersveiligheid.

In dit hoofdstuk gaat het om de vraag hoe een betere aansluiting te maken is met relevant onderzoek naar verkeersveiligheid. Eerst wordt daarvoor de uitgangspositie van verkeersveiligheidsonderzoek beschreven, voor zover relevant geacht in het kader van de uiteindelijk toepassing en/of ontwikkeling van verkeersmodellen (*Paragraaf 4.1*). Vervolgens worden in *Paragraaf 4.2* onderwerpen beschreven waarvoor verkeersmodellen naar verwachting op relatief korte termijn al een rol van betekenis kunnen spelen. *Paragraaf 4.3* gaat in op veelbelovende onderwerpen binnen de modelleringsaanpak waarvoor naar verwachting nog een relatief lang ontwikkeltraject nodig zal zijn voordat ze als instrument in het verkeersveiligheidsonderzoek betrokken kunnen worden.

### 4.1. Uitgangspositie van verkeersveiligheidsonderzoek

#### 4.1.1. Piramidemodel

Onderzoek naar verkeersveiligheid, zoals door de SWOV uitgevoerd, heeft een fundamenteel, anticiperend karakter. Het is daarbij onder meer van belang effecten van maatregelen op verkeersveiligheid te kunnen verklaren en te voorspellen. Vaak wordt het piramidemodel gebruikt om de keten van oorzaken en gevolgen die leiden tot verkeersonveiligheid, inzichtelijk te maken - zie *Afbeelding 4.1* (Wegman et al., 2005).



Afbeelding 4.1. Hiërarchisch piramidemodel voor verkeersveiligheid (Wegman et al., 2005).

Aan de top van de piramide zit de laag 'social costs', waarin de maatschappelijke kosten van verkeersonveiligheid worden gerelateerd aan aantal verkeersslachtoffers, de laag daar direct onder. Traditioneel richt veel onderzoek zich op deze tweede laag, die ook met 'final outcomes' wordt aangeduid. Zo doet de SWOV onderzoek naar kencijfers die onder meer worden gebruikt in (statische) verkeersmodellen. De combinatie van kencijfers met het aantal voertuigkilometers levert dan een voorspelling op van het aantal slachtoffers (zie Paragraaf 3.2.1). Er zijn echter problemen met het verkrijgen van goede ongevallendata (voornamelijk de registratiegraad), en er is behoefte aan meer inzicht in de onveiligheid voorafgaand aan ongevallen.

Wanneer we de piramide naar beneden toe doorlopen, dan vinden we boven het niveau van de *beleidsprogramma's en maatregelen*, het niveau 'intermediate outcomes'. Deze laag beschrijft de (veiligheids)kwaliteit van componenten van het verkeerssysteem, vaak met de traditionele onderverdeling mens-voertuig-weg, en bijbehorende risicofactoren. Het effect van een goede maatregel zal het eerst doorwerken op de operationele condities van het verkeer op dit niveau, en na verloop van tijd zal dat zichtbaar zijn in slachtofferreducties. Goed inzicht in wat zich op dit niveau afspeelt, zorgt voor een effectievere, snellere verbetering van de verkeersveiligheid.

Voor een goed inzicht op dit niveau zijn indicatoren nodig die een verband leggen tussen deze laag en aantallen slachtoffers (de zogeheten 'safety performance indicatoren' (SPI's)). Daarbij gaat het bijvoorbeeld om snelheid, gordels dragen, rijden met alcohol op, de kwaliteit van wegen, de kwaliteit van voertuigen, en de samenstelling van het voertuigenpark.

De eerder beschreven afgeleide indicatoren die gebruikt worden binnen verkeersmodellen om de verkeersveiligheidseffecten te beschrijven, bevinden zich op het niveau van de SPI's. Er is ook overlap, zoals bijvoorbeeld met indicatoren die snelheidsgedrag beschrijven. Net als voor de afgeleide indicatoren is voor SPI's kennis over causale verbanden met (letsel)ongevallen van groot belang. De lacunes die daar nog liggen, zijn onderwerp van veel lopend, nationaal en internationaal onderzoek (SafetyNet, 2007).

#### 4.1.2. Accident prediction models (APM's)

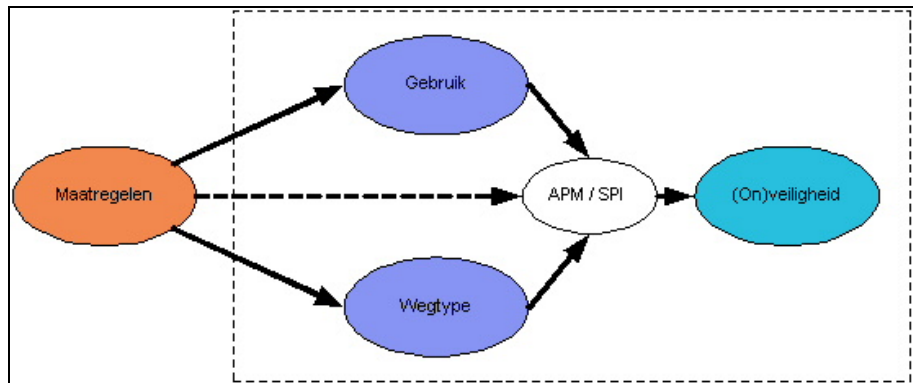
In het onderzoek naar de kwaliteit van het verkeerssysteem en de relatie met letselongevallen worden meerdere onderzoeksmethoden en -instrumenten gebruikt. Een voorbeeld daarvan zijn de *ongevallenmodellen* (*Accident Prediction Models, APM's*), die beogen letselongevallen te voorspellen op basis van een kwantitatieve relatie met grootheden die de verkeerssituatie beschrijven.

In de literatuur zijn APM's beschreven waarbij een relatie wordt gelegd tussen ongevallen en expositie- of 'gebruiks'-maten, zoals verkeersintensiteit, en -dichtheid, en de ratio intensiteit/capaciteit. Naar de relatie tussen intensiteit en ongevallen zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd die ingaan op de wiskundige vorm van de relatie, de toepassing ervan op kruispunten bij meerdere modaliteiten en tijdsperioden (etmaal of uurintensiteit) (Dijkstra, 1998; Lord et al. 2005; Reurings & Janssen, 2007). Door Lord et al. (2005) is tevens een uitbreiding van de relatie tussen ongevallen en intensiteiten geschat door het meenemen van de dichtheid. Chang et al. (2000) en ook Lord et al. (2005) hebben de relatie geschat tussen de I/C-ratio en het aantal ongevallen.

Een veel gebruikte relatie tussen ongevallen en snelheid is de relatie die Nilsson (1981) vond tussen snelheid (snelheidslimiet) en verkeersongevallen en gemiddelde snelheid en ongevalsrisico Louwerse (2003) gebruikte deze relatie ook voor het schatten van veiligheidseffecten van ISA met het microsimulatiepakket VISSIM. Naast Nilsson zijn er onderzoeken geweest waarbij een verband is geschat tussen de veranderingen in aantal ongevallen en veranderingen in snelheid (Aarts, 2004).

Andere APM's leggen een relatie tussen kenmerken van wegtypen of wegvakken/kruispunten en ongevallen. Zo'n APM berekent dan het verwachte aantal ongevallen voor een wegvak of kruispunt met bepaalde geometrische kenmerken op basis van de berekende of gemeten expositie. Deze Accident Prediction Models lijken veel op de Safety Performance Indicators (SPI's) waarmee de kwaliteit van het verkeerssysteem wordt beschreven in relatie tot de verkeersveiligheid. Beide maken gebruik van dezelfde indicatoren/verklarende variabelen, omdat deze variabelen een (verwachte) causale relatie kennen met (letsel)ongevallen. Hier liggen echter, zoals eerder aangegeven, nog wel lacunes die onderwerp zijn van veel lopend nationaal en internationaal onderzoek. Het verschil tussen APM's en SPI's is dat bij een APM het aantal (letsel)ongevallen de uitkomst is en wordt bepaald op basis van kennis over verklarende variabelen zoals snelheid, intensiteit en dichtheid. Bij een SPI is, zoals de naam al zegt, de uitkomst niet noodzakelijkerwijs het aantal (letsel)ongevallen, maar verklarende variabelen zoals snelheidsverdelingen en TTC (Dijkstra & Drolenga, 2007).

Als er voldoende vertrouwen in de kwaliteit van Safety Performance Indicators (SPI's) en Accident Prediction Models (APM's) is, kunnen door koppeling van de informatie uit het verkeersmodel (gebruik en wegtypen) uitspraken gedaan worden over de mate van (on)veiligheid. Dit is weergegeven in *Afbeelding 4.2*.



Afbeelding 4.2. *Bepaling verkeersveiligheidseffecten met behulp van verkeersmodellen. (AVV, 2004).*

Problemen die zich kunnen voordoen bij het schatten van een APM zijn de slechte kwaliteit van ongevalgegevens en van de geometrische kenmerken, schattingen van 'gebruiksvariabelen' op basis van te beperkte tellingen, te geringe omvang van de steekproef en de onmogelijkheid om verstoringen te verklaren. Daarbij komt dat de gegevens van de geometrie van wegvakken en kruispunten en 'gebruiksvariabelen' vaak een momentopname zijn, terwijl de bijbehorende ongevalgegevens een veel langere periode beslaan waarin veel veranderingen kunnen plaatsvinden (AVV, 2004; Han, 2005). Dergelijke problemen belemmeren een snelle ontwikkelingen van deze modellen.

Het verband tussen onderzoek aan en toepassing van APM's en verkeersmodellen zit in het feit dat in het verkeersmodel zowel de gebruikskarakteristieken als wegkarakteristieken kunnen worden betrokken. De bijbehorende relaties tussen ongevallen en deze variabelen zouden zowel geïmplementeerd (als effectmodel) als verder bestudeerd/ontwikkeld kunnen worden in verkeersmodellen.

Het is duidelijk dat empirische gegevens een onmisbare schakel vormen voor het valideren van APM's. Goede verkeersmodellen kunnen echter meehelpen om 'gaten' in gemeten data op te vullen; ook kunnen ze gegevens aanleveren die erg moeilijk empirisch te verkrijgen zijn.

#### 4.1.3. *De positie van verkeersmodellen*

Empirische gegevens vormen ook een onmisbare schakel voor het testen van de effecten van maatregelen in het werkelijke verkeer. Bij ADAS, bijvoorbeeld, is er het probleem dat statistisch relevant ongevalonderzoek (nog) niet mogelijk is, vanwege de lage penetratiegraad van de systemen in het huidige wagenpark. Om meetgegevens uit de praktijk te krijgen, worden voor 'impact assessment' van de meeste ITS zogeheten veldexperimenten gebruikt (*field operational tests, FOT*). Daarin worden data verkregen van een beperkt aantal geïnstrumenteerde voertuigen te midden van 'normaal' verkeer. Voor de evaluatie wordt daarbij vooral een beroep gedaan op afgeleide indicatoren (ervan uitgaand dat ontwikkelingen rondom die indicatoren, van SPI's en van APM's ook autonoom verder gaan). Ook wordt vaak gekeken naar specifiek verkeersgedrag van proefpersonen, en naar ervaringen die proefpersonen met de betreffende systemen hebben

opgedaan. Idealiter zouden dergelijke experimenten een dusdanige omvang moeten hebben, dat een significant aantal relevante ongevallen voor evaluatie beschikbaar is.

Het is vaak moeilijk een representatief veldexperiment op te zetten, en daarnaast is het erg bewerkelijk. Dat geldt voor veel nieuwe ADAS, waarmee het voertuigenpark nog maar beperkt is uitgerust. Daarnaast maken omgevingsinvloeden het vaak niet makkelijk om metingen te relateren aan een specifieke conditie of maatregel.

In een *rijnsimulator* speelt dat probleem minder, want proefpersonen rijden dan in een virtuele, meer geconditioneerde verkeersomgeving. Specifieke condities kunnen daarin beter onderzocht worden, maar het is dan wel moeilijk om de vertaalslag naar een heel netwerk te maken, omdat er vaak slechts een enkele proefpersoon per test aan het rijden is. Een interessante uitbreiding betreft het werk van Houtenbos et al. (2006), waarbij proefpersonen in twee aparte rijnsimulators, maar wel in dezelfde omgeving, rijden en aldus op elkaar kunnen reageren.

Gegeven de beperkingen van de genoemde instrumenten heeft *microsimulatie* op het eerste gezicht een aantal aantrekkelijke kanten. Zo kan het effect van een enkele maatregel of de gevoeligheid van uitkomsten voor een onderzoeksvariabele, in een sterk geconditioneerde of gesloten omgeving worden bepaald. Daarnaast wordt de vertaalslag van een lokale omgeving naar een groter netwerk doorgaans eenvoudig gemaakt. Nieuwe maatregelen of systemen kunnen daarbij getest worden zonder de bestaande verkeersnetwerken te hinderen of mensen aan risico's bloot te stellen. Zoals eerder al genoemd kan ook informatie verkregen worden over grootheden die niet of heel moeilijk empirisch te verkrijgen zijn. Deze vorm van modelleren maakt het mogelijk op een kosteneffectieve manier en in een vroeg stadium verschillende scenario's van maatregelenpakketten of alternatieve systeemontwerpen met elkaar te vergelijken. Daarbij biedt deze aanpak ook mogelijkheden om al in een vroeg stadium van het besluitvormingsproces een balans te vinden tussen de verschillende en soms conflicterende doelen in het verkeers- en vervoersbeleid (veiligheid, milieu, afwikkeling). Daarbij is het ook gunstig dat de methode over het algemeen goede faciliteiten biedt voor visualisatie van uitkomsten, zowel voor de experts als het niet-technisch publiek (Archer, 2001; 2005).

Naast voordelen kennen microsimulaties uiteraard ook beperkingen. Zo is het ondoenlijk om alle individuele verkeersdeelnemers met hun eigen specifieke kenmerken te modelleren. Daarnaast speelt het gebrek aan 'bewezen' veiligheidsindicatoren microsimulaties parten. Deze twee zaken spelen overigens ook bij de andere methoden, in meer of mindere mate. Veldexperimenten en onderzoek in rijnsimulators kunnen en zullen moeten bijdragen aan verbeterde gedragsmodellen in microsimulaties (zie voorbeelden in het vorige hoofdstuk).

Uiteindelijk zou het mogelijk moeten zijn om tot een overkoepelende 'impact assessment'-aanpak te komen, door de verschillende methoden in een goede wisselwerking met elkaar toe te passen, zodanig dat de methoden elkaar aanvullen. Een eerste aanzet hiervoor wordt gegeven door Tapani (2007, 2008) in de vorm van een globaal evaluatieraamwerk voor ADAS.



#### 4.1.4. Basishouding

Deskundigen zijn zich bewust van de voor- en nadelen van het gebruik van verkeersmodellen voor onderzoek naar de verkeersveiligheid. De beperkingen worden echter tot op zekere hoogte geaccepteerd, vaak vanuit de overweging dat er geen geschikt alternatief voorhanden is. Daarnaast leeft de overtuiging dat er duidelijke verbeterlagen te maken zijn, al betreft dat vooral langere ontwikkeltrajecten, die overigens ten dele al wel zijn ingezet. Dit neemt niet weg dat er nu reeds een aantal geschikte toepassingsmogelijkheden zijn van simulatiemodellen binnen verkeersveiligheidsonderzoek. Voorbeelden daarvan zijn in de literatuur beschreven.

Om te bezien hoe nu verder te gaan, is het ten eerste zinvol om een onderscheid te maken tussen onderwerpen *die relevant zijn op de kortere termijn* en *op de langere termijn* (zie de volgende sectie). Daarbij is het ook zinvol om een beschrijving te maken van de *basishouding tegenover het gebruik van verkeersmodellen voor onderzoek naar verkeersveiligheid*. Een dergelijke 'code voor verantwoord gebruik' heeft op dit moment vooral betrekking op onderwerpen die op de kortere termijn relevant zijn, zoals de 'impact assessment' van ADAS met microsimulaties. Naar verwachting zal de basishouding echter ook van toepassing zijn op andere onderwerpen binnen het onderzoek naar verkeersveiligheid.

Uit de literatuur, de eigen ervaringen van de SWOV in het project Routekeuze, en de ervaringen van de geraadpleegde deskundigen, blijkt dat verkeersmodellen vooral van waarde zijn in een vroeg stadium van het onderzoek. Ze worden dan bij voorkeur gebruikt om binnen het modelgebied:

- een onderscheid te kunnen maken tussen varianten van maatregelen met grote verschillen in effectiviteit (met andere woorden: om het kaf van het koren te scheiden);
- de gevoeligheid van het te bestuderen probleem voor specifieke condities te analyseren.

In beide gevallen gaat het om een kwalitatieve vergelijking van de uitkomsten voor verschillende instellingen/varianten/specificaties. Vergelijking van de absolute waarden van uitkomsten is af te raden, omdat de causale verbanden tussen de afgeleide maten en ongevallen nog niet in kwantitatieve relaties beschreven kunnen worden. Verder kunnen de uitkomsten het best op geaggregeerd niveau worden bekeken (route, netwerk), omdat de modellen op detailniveau nog de nodige onnauwkeurigheid vertonen. Daarbij speelt ook mee dat de registratie van ongevallen op gedetailleerd niveau (kruispunt, wegvak) beduidend onnauwkeuriger is dan op netwerkniveau. Daarnaast vraagt het gebruik van de modellen goede kennis van zaken, om te vermijden dat men resultaten/effecten aan de onderzochte maatregel toekent die feitelijk het gevolg zijn van de wijze waarop de maatregel is gemodelleerd en die daardoor overeenkomen met de invoer van het model.

Een meer kwantitatieve voorspelling van ongevallenreducties door ADAS kan alleen plaatsvinden wanneer systeem- en gedragseffecten voldoende realistisch kunnen worden gemodelleerd, en dan alleen die effecten die een sterk causaal verband hebben met ongevallen. Wanneer deze zaken zich in

de loop der tijd verbeteren, dan kunnen de modellen een sterker voorspellend karakter krijgen.

## 4.2. Relevantie op korte termijn

### 4.2.1. 'Impact assessment' van ADAS

Veel ADAS zijn in aanleg geschikt voor evaluaties met verkeersmodellen (Tapani, 2007). Vooral systemen die zich richten op snelheidsondersteuning (met name verschillende vormen van SpeedAlert en ISA) zijn interessant vanwege hun hoge verwachte effectiviteit (Morsink et al., 2008).

Deze systemen hebben ook een relatief eenvoudige functionaliteit, hetgeen voordelig is voor modellering in het huidige stadium van de ontwikkeling van de modellen. Met betrekking tot de gedragseffecten is het thema snelheid naar verwachting overheersend. Dat is gunstig omdat er relatief veel kennis beschikbaar is over de relatie tussen snelheid en ongevallen. Er zijn overigens meer gedragseffecten dan alleen snelheidskeuze, hetgeen het modelleren van bestuurdersgedrag niet per definitie eenvoudiger maakt dan bij systemen met een complexere functionaliteit, wanneer het onderzoek beoogt zo volledig mogelijk te zijn. Gedragsadaptatie en risicocompensatie gedrag treden ook hier op (bijvoorbeeld veranderend inhaalgedrag).

Microsimulatie is nodig om op het niveau van individuele voertuigen en individuele bestuurders relevante onderzoeksvariabelen te kunnen toepassen, gerelateerd aan de functionaliteit van de systemen en het daaraan gekoppelde bestuurdersgedrag. Op korte termijn ligt het niet voor de hand dat grote aanpassingen wat betreft bestuurder-voertuigmodel, indicatoren) in de beschikbare pakketten worden doorgevoerd. Daardoor zal in eerste instantie uitgegaan moeten worden van een relatief eenvoudig model met enkele primaire gedragskenmerken in een beperkt aantal variaties. Uiteraard is het wel zo dat gedrag van een individuele bestuurder in het model voorspelbaar is. Een simulatie geeft immers geen bestuurdersgedrag als uitkomst van een bepaald verkeersscenario. Wanneer sprake is van een verkeersscenario waarin meerdere bestuurders betrokken zijn, dan wordt die voorspelbaarheid al een stuk kleiner. Wanneer dan ook nog eens verschillende bestuurderscategorieën worden gedefinieerd met bepaalde statistische verdelingen over de beschikbare gedragsparameters, dan is er geen sprake meer van een voorspelbare afloop.

Huidige variatiemogelijkheden van de beschikbare pakketten zijn (Wismans, 2003):

- penetratiegraad van de systemen;
- functionele instellingen van de systemen;
- instellingen van beschikbare gedragsparameters;
- aanbod: netwerkopbouw, wegtypen (onder andere snelheidslimieten);
- maatregelen (onder andere VRI's);
- verkeersvraag;
- samenstelling van het verkeer.

De veiligheidseffecten van deze variaties kunnen voorlopig het best op netwerkniveau worden bestudeerd. Daarnaast kunnen bepaalde routes, relaties, wegvakken of kruispunten worden geselecteerd voor analyses in meer detail. Als veiligheidsindicatoren kunnen voorlopig de gangbare

afgeleide indicatoren (snelheid, TTC en andere conflictmaten), aangevuld met PCE die de zwaarte van conflicten vastlegt (ook rekening houdend met conflicten tussen verschillende typen verkeersdeelnemers) worden gebruikt.

De pakketten S-PARAMICS en VISSIM zijn momenteel beschikbaar bij de SWOV. Bij onderzoek in 2005 bleek dat S-PARAMICS minder geschikt was voor de modellering van ISA-achtige systemen, vanwege beperkingen in de modellering van de ISA-functionaliteit (Jansen, 2005). Inmiddels zou in S-PARAMICS ook een harde ISA-variant gemodelleerd kunnen worden, hetgeen in VISSIM al wat langer kon. VISSIM heeft ook modellen voor kwetsbare verkeersdeelnemers (fietsers, voetgangers), die daarmee dan ook in de 'impact assessment' betrokken zouden kunnen worden (bijvoorbeeld in aanvulling op de studie van Ma & Andreasson, (2005)).

Overigens is het zinvol om een *benchmarkstudie* uit te voeren naar verschillen tussen beschikbare pakketten met betrekking tot de modellering van snelheidsgedrag. Hiermee kan de keuze van een pakket beter gemotiveerd worden en kan tegelijkertijd de (modellerings)uitgangspositie voor het beantwoorden van de ISA-vraagstellingen duidelijker worden. Jansen (2005) heeft hier al een aanzet voor gegeven in de vorm van een *gevoeligheidsanalyse van relevante parameters* in S-PARAMICS. Ook Wismans (2003) besteedde hier aandacht aan, maar dan vooral vanuit vraagstellingen rondom routekeuze. Wanneer de ISA-functionaliteit in S-PARAMICS wel volwaardig is gemodelleerd, komt er een interessante mogelijkheid tot een koppeling met lopende routekeuzeonderzoek. De *effecten van navigatiesystemen met ISA* zouden dan bijvoorbeeld bestudeerd kunnen worden.

De 'impact assessment' van snelheidsondersteunende systemen zou ook gekoppeld kunnen worden aan breder onderzoek in het werkveld ITS en gedrag. Recent is er een rijnsimulatorstudie uitgevoerd naar de gezamenlijke effecten van ISA en de geloofwaardigheid van snelheidslimieten (Van Nes et al., 2007). De uitkomsten hiervan zouden in een modelstudie overgenomen kunnen worden om netwerkeffecten te bestuderen. Lopend onderzoek richt zich op het effect van dynamische limieten op snelheidsgedrag.

Ook voor de 'impact assessment' van andere ADAS zijn er mogelijk initiatieven waarbij aangehaakt kan worden, bijvoorbeeld in het kader van TRANSUMO, follow-upwerk vanuit het Europese IN-SAFETY project (IN-SAFETY, 2007) of nieuwe 7<sup>e</sup>-kaderprojecten. Daarbij is het ook interessant om te bezien in welke mate 'impact assessment' op het niveau van sociaal-economische evaluatie (monetaire effectschatting; de top van de piramide in *Afbeelding 4.1*) mogelijk is. Meerdere Europese projecten hebben daar aandacht aan besteed vanuit een verkeersmodellenaanpak (Malone et al., 2003; eIMPACT 2007).

#### 4.2.2. Koppeling kencijfers en APM's

De kencijfers die momenteel in verkeersmodellen worden toegepast, hebben overwegend een statisch karakter (zie ook 3.2.1). De nadruk ligt meestal op het prognosticeren van de verschillen in het gebruik van wegtypen en daarmee de verkeersveiligheid (*expositiekant*). Een recent voorbeeld van onderzoek waarin deze aanpak wordt gehanteerd zijn de zogeheten netwerkanalyses (Schermers et al., 2008).

Daarnaast zijn er APM's in ontwikkeling die veranderingen van intensiteiten, snelheden en/of wegkenmerken en wegtypen relateren aan ongevallen. Met deze kennis komt er meer nadruk te liggen op het prognosticeren van de wijzigingen in kencijfer door bepaalde maatregelen (*risicokant*).

Dit kan uiteindelijk resulteren in een soort *dynamische kencijfers*, die zich als functie van de tijd of plaats aanpassen aan de lokale omstandigheden. Deze zouden vervolgens in verschillende typen dynamische modellen toegepast kunnen worden, en een koppeling met de door de SWOV ontwikkelde Verkeersveiligheidsverkenner voor de Regio (VVR) lijkt erg relevant.

Zolang gedragsmodellen op detailniveau in microsimulatiemodellen nog niet voldoende nauwkeurig zijn, zal de toepassing van deze kencijfers zich vooral concentreren op een hoger aggregatieniveau, in macroscopische dynamische (en statische) modellen. Verkeersmodellen hebben hun waarde al bewezen op netwerkniveau en worden geacht valide resultaten te genereren op het niveau van intensiteiten en snelheden. Vervolgens kan er met verkeersmodellen, een steeds betere schatting gemaakt worden van verkeersveiligheidseffecten op netwerkniveau wanneer er meer goed gevalideerde APM's beschikbaar zijn.

Met de toenemende nauwkeurigheid van microsimulatiemodellen en verschillende APM's komen ook toepassingen op een hoger detailniveau in microsimulatie nadrukkelijk in beeld. (zie ook 4.3.3).

#### 4.3. Relevantie op langere termijn

In het algemeen zullen de ervaringen op de korte termijn helpen om de positie van verkeersmodellen als onderzoeksinstrument voor verkeersveiligheid nader te bepalen. Voor een instituut als de SWOV heeft dit betrekking op zowel het eigen onderzoek met behulp van verkeersmodellen als op de beoordeling van onderzoek gedaan en advies uitgebracht door andere partijen. Daarnaast is er een aantal zaken dat op voorhand al aandacht verdient voor (in het belang van of voordat? in het belang van) de verdere ontwikkeling van de modellen op de langere termijn. De volgende secties geven hier relevante voorbeelden van, in het verlengde van het in *Paragraaf 3.3* besprokene.

##### 4.3.1. Bestuurdersmodellen

Eén van de eerste stappen in het verbeteren van gedragsmodellen ten behoeve van de 'impact assessment' van ADAS, is het scheiden van modellen voor bestuurders en voertuigen. Dit is nodig voor een éénduidige evaluatie van specifieke ADAS voor specifieke doelgroepen en voertuigtypen en in specifieke omstandigheden.

Het opstellen van voertuigmodellen is relatief eenvoudig, want dat gaat vooral over fysiek meetbare kenmerken of systeeminstellingen. Het opstellen van gevalideerde bestuurdersmodellen is een veel complexer proces. In het verleden is er al wel het nodige gedaan, waarbij vaak resultaten uit onderzoek in rijsimulatoren, experimenten met geïnstrumenteerde voertuigen of veldexperimenten waren betrokken, maar er zal nog veel aanvullend fundamenteel onderzoek nodig zijn.

In verschillende onderzoeken is al begonnen met het combineren of integreren van simulator- en simulatiestudies voor het verbeteren van bestuurdersmodellen. Voorbeelden zijn de eerder genoemde studies van

Yannis naar ACC-technologie (Yannis et al., 2003) en de evaluatie van de Chauffeur Assistent (Schermers & Malone, 2004a/b). Hierbij is het gedrag van bestuurders onderzocht met een simulator en vervolgens vertaald naar een simulatiemodel. In het Europese IN-SAFETY-project wordt het effect van een in-voertuig 'virtual rumble strip' (een soort Lane Departure Warning-systeem) onderzocht op inhaal- en snelheidsgedrag. De resultaten worden ingebracht in het verkeersmodel RuTSim (Tapani, 2008). Van Driel (2007) heeft gedragseffecten van een in-voertuig fileassistent onderzocht in een rijnsimulator, en via de ITS-modellerapplicatie van TNO het bestuurdersmodel van PARAMICS en de effecten op verkeersstromen onderzocht.

Koppelingen van simulatoronderzoek met verkeerssimulaties zijn ook nuttig voor combinaties van effectbepalingen op microniveau en netwerkniveau. Simulatoronderzoek kan tevens profiteren van simulatiemodellen, omdat op die manier het omringende verkeer in de simulator realistischer kan worden gesimuleerd.

Ook de koppeling tussen experimentele (real life) data en modelsimulaties wordt zo nu en dan gemaakt. Hoetink (2003) en Marsden et al. (2001) geven voorbeelden daarvan. Tate et al. (2006) beschrijven een voorbeeld van de toepassing van 'floating car'-data voor de kalibratie en validatie van simulatiemodellen. Daarnaast dienen zich nieuwe (inter)nationale ontwikkelingen op het gebied van FOT's aan (zie bijvoorbeeld eSafety (2006)). Deze bieden wellicht ook mogelijkheden voor de koppeling tussen experimentele data en microsimulatie.

Uit de tot nu toe verkregen inzichten is wel duidelijk dat het modelleren van individuele verkeersdeelnemers niet realistisch is. Categoriseren van bestuurders, op basis van een verzameling onderscheidende kenmerken van verkeersgedrag, lijkt wel binnen bereik te liggen. Gedragsonderzoek, bijvoorbeeld met de genoemde methoden, zou dan kunnen resulteren in geschikte statistische verdelingen van de verkeersdeelnemers over die kenmerken. Ook onderzoek naar het modelleren van menselijke fouten is mogelijk interessant (op het zogeheten nanoniveau, zie eerder). Als mogelijk alternatief daarvoor zouden ook bepaalde 'random gedragstriggers' ingebouwd kunnen worden, waarmee het effect van onvoorspelbaar gedrag kan worden bestudeerd. Het onderzoek van Archer (2005) geeft hier een eerste aanzet toe.

Een andere interessante ontwikkeling is de al genoemde ITS-modeller van TNO. Deze microsimulatieomgeving is thans gekoppeld aan PARAMICS (Quadstone-versie), en het idee is om meerdere pakketten hierbij te betrekken. Via de ITS-modeller kan het standaard bestuurders- en voertuiggedrag in PARAMICS aanpassen/aangepast worden, via uitbreiding van de (gescheiden bestuurder-voertuig)modellen die in MIXIC al langere tijd beschikbaar waren. Een innovatief aspect van de ITS-modeller is dat tussen verschillende rijtaakniveaus van bestuurders (strategisch, manoeuvre, operationeel) kan worden geschakeld. Andere bestuurdersmodellen zouden zich voornamelijk op een van deze taken richten (TRANSUMO, 2007). Het modelleren van kruispunten is een belangrijk aandachtspunt in de ontwikkeling van de ITS-modeller. Er worden inspanningen verricht om kruispuntmodellen te verbeteren om daarmee evaluaties van ADAS op kruispunten te kunnen uitvoeren (Abdoelbasier, 2006; Schaap & Van Arem, 2006; Van Dijck, 2008).

#### 4.3.2. *Onderzoek naar nieuwe indicatoren*

Om goed onderzoek te doen is er behoefte aan goede afgeleide indicatoren die de schaarse, vaak onvolledige of niet beschikbare ongevallendata kunnen vervangen. Uiteraard blijft de relatie van deze indicatoren met ongevallen een belangrijk aandachtspunt (evenals voor SPI's en APM's overigens). Naast verbeteringen van de reeds ontwikkelde afgeleide indicatoren liggen zijn er ook mogelijkheden om nieuwe/aangepaste indicatoren te ontwikkelen. Mogelijk kunnen ADAS-ontwikkelingen, zoals voertuig-voertuigcommunicatie, als basis dienen voor dergelijke veiligheidsindicatoren. Bij voertuig-voertuigcommunicatie kijkt een voertuig verder dan zijn directe omgeving en zijn algoritmes ontwikkeld die gebaseerd zijn op een veilige verkeersafwikkeling. De belangrijkste parameters uit die algoritmes kunnen mogelijk ook als veiligheidsindicator fungeren.

Parallel daaraan zal het goed bestuderen van ongevallendata ook inzichten voor nieuwe indicatoren kunnen opleveren. Uiteraard is de kwaliteit van de ongevallenregistratie een belangrijke factor hierbij, en zullen mogelijk vooral gegevens uit in-depth ongevalsanalyses nodig zijn. Nieuwe datacollectie-methoden zoals via Event Data Recorders (EDR) en/of 'floating car'-data (FCD) kunnen hiervoor van groot belang zijn.

#### 4.3.3. *Hybride modellen*

De verwachting is dat verkeersmodellen op verschillende niveaus zich de komende tijd verder zullen ontwikkelen, softwarematig, functioneel en wat betreft geïntegreerde verkeersveiligheidskennis (met behulp van APM's bijvoorbeeld). Tegelijkertijd is de verwachting dat er een toenemende vraag zal zijn naar het bestuderen van effecten op netwerkniveau en op gedetailleerder niveau, en de interactie daartussen. Dit opent mogelijkheden voor zogeheten hybride modellen: modellen waarin binnen één overkoepelende modelleeromgeving geschakeld kan worden tussen verschillende typen modellen.

Zoals een simulatorstudie en microsimulatiestudie elkaar kunnen aanvullen in de effectbepaling kan ook gedacht worden aan een koppeling van de output van een microscopisch model aan een mesoscopisch, macroscopisch dynamisch of zelfs statisch verkeersmodel (Barcelo et al. (2006).

Veiligheids- en afwikkelingseffecten uit het microscopisch simulatiemodel kunnen dan overgebracht worden naar het macroscopische dynamische/statische verkeersmodel. Andersom kan ook.

Zo kan een veiligheidsprobleem op netwerkniveau worden gesignaleerd, waarna ingezoomd wordt op één of meerdere specifieke wegen, wegvakken of kruispunten. En het effect van een wijziging op lokaal niveau kan relatief gemakkelijke en snel worden onderzocht op netwerkniveau. Ten aanzien van afwikkeling kan bijvoorbeeld een knelpunt worden gesignaleerd op netwerkniveau, dat zich vervolgens kan laten herleiden tot een lokaal knelpunt.

Wanneer APM's en microsimulatiemodellen beide een goede ontwikkeling doormaken, dan kunnen APM's inzicht geven in lokale effecten. Vervolgens kunnen die weer teruggekoppeld worden naar het netwerkniveau. Dit biedt tevens de mogelijkheid om de eerder geïntroduceerde dynamische kencijfers nog specifiek te maken.

Nog een stap verder zou het zelfs mogelijk zijn om een koppeling te maken met 'botsmodellen' zoals MADYMO of PC-Crash. Voor een risicovol kruispunt zou dan bijvoorbeeld de ernst van mogelijke ongevallen kunnen worden bestudeerd.

## 5. Conclusies en aanbevelingen

### 5.1. Conclusies

Dit rapport geeft een overzicht van mogelijke toepassingen van verkeersmodellen voor verkeersveiligheidsonderzoek op basis van literatuuronderzoek. Het helpt daarmee om keuzes te maken binnen het verkeersveiligheidsonderzoek, waarbij verkeersmodellen een rol kunnen spelen, en het verbetert de mogelijkheden om relevant onderzoek met verkeersmodellen te beoordelen.

Verkeersmodellen worden al langere tijd gebruikt om de veiligheidseffecten van een breed spectrum aan verkeersmaatregelen te schatten. In toenemende mate worden ook de effecten van specifieke verkeersveiligheidsmaatregelen met verkeersmodellen geschat.

Relevante onderwerpen in de bestudeerde literatuur zijn met name de 'impact assessment' van Intelligente Transportsystemen (ITS), met nadruk op in-voertuig Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), en toepassingen van kencijfers en Accident Prediction Models (APM's). Voor het eerste onderwerp is modellering van belang op het niveau van individuele verkeersdeelnemers, die in de tijd variërende gedragskeuzes maken. Dynamische microscopische modellen komen hiervoor het meest in aanmerking. Bij het tweede onderwerp gaat het meer om geaggregeerde grootheden zoals intensiteiten en snelheden van verkeersstromen, waarvoor met name macroscopische modellen geschikt zijn. De nadruk in dit rapport ligt op het eerste onderwerp, mede vanwege de actuele vraagstellingen hieromtrent in het SWOV-onderzoeksprogramma en in verschillende nationale en internationale samenwerkingsverbanden, zoals TRANSUMO en de Europese kaderprogramma's.

Voor de 'impact assessment' van in-voertuig-ADAS zijn dynamische microscopische verkeersmodellen vooral zinvol in combinatie met andere methoden, zoals rijnsimulatoronderzoek en 'field operational tests' (FOT). De modellen hebben daarin een toegevoegde waarde. Ten eerste kunnen de effecten van individuele maatregelen of ontwikkelingen (bijvoorbeeld de introductie van ISA, ACC, etc.) in een sterk geconditioneerde omgeving geschat worden. Dat geldt ook voor de gevoeligheid van uitkomsten voor specifieke condities of onderzoeksvariabelen (bijvoorbeeld typen bestuurders, systeeminstellingen, snelheidslimieten, etc.). Tevens kunnen effecten zowel op lokaal (kruispunt, wegvak) als op netwerkniveau (route, stad, regio) worden bepaald en kan informatie verkregen worden over grootheden die niet of moeilijk empirisch te verkrijgen zijn. De aanpak maakt ook een gezamenlijke beschouwing mogelijk van verschillende en soms conflicterende doelen in het verkeers- en vervoersbeleid (veiligheid, efficiëntie, milieu). Daarnaast biedt de methode vaak goede faciliteiten voor visualisatie van uitkomsten.

Naast deze mogelijkheden zijn er ook beperkingen waarmee rekening gehouden moet worden bij adequaat gebruik van de modellen. Het modelleren van individuele verkeersdeelnemers leunt stevig op bestuurdersmodellen. Echter, de gangbare bestuurdersmodellen bevatten niet veel



specifieke kennis op het gebied van verkeersveiligheid. Enerzijds komt dit doordat verkeersmodellen historisch gezien niet vanuit het oogpunt van verkeersveiligheid ontwikkeld zijn. Anderzijds zijn er sowieso nog behoorlijke kennislacunes op het vlak van modellering van menselijk verkeersgedrag. Daarnaast worden daadwerkelijke ongevallen niet in de modellering betrokken, en worden veiligheidseffecten geschat met afgeleide indicatoren, voornamelijk 'time-to-collision' (TTC) en varianten daarop. Dezelfde indicatoren worden ook gebruikt bij andere 'impact assessment'-methoden, vanwege de beperkte hoeveelheid en kwaliteit van de ongevalldata. Voor veel van deze indicatoren is er nog onbekendheid en discussie over de vorm van de causale verbanden met ongevallen. Afgezien daarvan is het voor een zinvolle toepassing van deze indicatoren in verkeersmodellen van groot belang dat voertuigbewegingen nauwkeurig worden gemodelleerd, anders kunnen ze geen waarden van betekenis opleveren. Het bovenstaande geeft aan dat de gevonden effecten vooral kwalitatief beoordeeld moeten worden. Een meer kwantitatieve voorspelling van ongevallenreducties door ADAS zou pas op de langere termijn kunnen plaatsvinden, wanneer systeem- en gedragseffecten voldoende bekend zijn en voldoende realistisch kunnen worden gemodelleerd.

De kencijfers die in macroscopische verkeersmodellen worden toegepast, zijn vooralsnog vooral statisch en richten zich op het prognosticeren van verschillen in het gebruik van wegtypen (expositiekant). Met APM's die veranderingen van intensiteiten, snelheden en/of wegkenmerken en wegtypen omvatten, kunnen ook de wijzigingen in kencijfers door maatregelen in de aanpak worden betrokken (risicokant). Dit kan uiteindelijk resulteren in een soort *dynamische kencijfers*, die zich als functie van de tijd of plaats aanpassen aan de lokale omstandigheden. Deze zouden vervolgens in verschillende typen dynamische modellen toegepast kunnen worden.

Al met al worden verkeersmodellen zinvol geacht voor ex-ante-evaluaties waarbij scenario's van maatregelenpakketten of alternatieve systeemontwerpen met elkaar worden vergeleken op basis van verkeersveiligheidseffecten, eventueel in combinatie met andere effecten. Dat geldt voor toepassingen gerelateerd aan beide genoemde onderwerpen. De uitkomsten moeten daarbij kwalitatief en op een geaggregeerd niveau (route, netwerk) worden beoordeeld. Vervolgens kunnen de uitkomsten richting geven aan vervolgonderzoek, en kunnen ze in een vroeg stadium het besluitvormingsproces ondersteunen.

## 5.2. Aanbevelingen

Bestuurdersmodellen en veiligheidsindicatoren zijn belangrijke aandachtspunten voor de verdere ontwikkeling van verkeersmodellen als instrument voor verkeersveiligheidsonderzoek. Daarbinnen zijn de opzet van de modellen, onderliggende keuzes, nauwkeurigheid en validatie belangrijke thema's.

De meeste softwarepakketten voor verkeerssimulaties gebruiken gecombineerde gedragsmodellen, waarin kenmerken van voertuigen en bestuurders met elkaar verweven zijn, vaak op onduidelijke gronden, waarbij de transparantie van de modelopbouw te wensen overlaat. Een voorbeeld hiervan zijn de modellen voor 'voertuigvolgedrag'. Daarbij is meestal niet

voldoende duidelijk hoe de acceleratiemogelijkheden van voertuigen, de instellingen van ACC en de rijstijl van betrokken bestuurders samenkomen. Voor de 'impact assessment' van ADAS, en ook voor veel andere verkeersveiligheidsvraagstukken, is het juist van belang een duidelijk onderscheid te maken tussen verschillende typen voertuigen en de bestuurders van die voertuigen. Dit impliceert een duidelijkere scheiding van voertuigmodellen en bestuurdersmodellen. Hiertoe zouden voertuigmodellen meer onderscheidend moeten zijn op basis van fysieke kenmerken en systeemalgoritmes van ADAS. In bestuurdersmodellen zou op een eenduidiger manier invulling gegeven moeten worden aan relevante onderscheidende gedragskenmerken van groepen verkeersdeelnemers. Ook kennis over foutmechanismen van bestuurders zou hierin betrokken kunnen worden. Een dergelijke opzet van de modellen draagt naar verwachting bij aan een transparantere modelopzet, nauwkeurigere uitkomsten, en een eenduidigere uitgangssituatie voor validatie van de (sub)modellen.

De validatie van bestuurdersmodellen is een complexer proces dan van voertuigmodellen. Er zal nog veel fundamenteel onderzoek nodig zijn, waarbij naar verwachting wederzijdse interacties tussen modelstudies, rijnsimulatorstudies en FOT's belangrijk zullen zijn. Verder is aansluiting nodig bij onderzoeken die al begonnen zijn met het combineren of integreren van verkeersdata, rijnsimulators en verkeersmodellen voor het verbeteren van bestuurdersmodellen.

Vanuit het onderzoeksveld is er een continue behoefte aan gevalideerde indicatoren. Voor de nu gebruikte indicatoren blijven de causale verbanden met ongevallen een belangrijk aandachtspunt. Daarnaast liggen er ook kansen in de ontwikkeling van nieuwe/aangepaste indicatoren, bijvoorbeeld met in-depth ongevalsanalyses, nieuwe datacollectiemethoden, of op basis van algemeen voortschrijdend inzicht.

Voor ADAS-'impact assessment' is het op korte termijn relevant om een verdere uitwerking te maken van een methode waarin de verbanden tussen microsimulatiemodellen en andere methoden (rijnsimulator, FOT's, ongevalsanalyse) specifiek zijn aangegeven. Om te beginnen zou een conceptueel raamwerk moeten worden opgesteld, dat vervolgens concreter gemaakt wordt met een verkennende case. De combinatie van navigatiesystemen met ISA-varianten zou daarin centraal kunnen staan, bijvoorbeeld in aansluiting op lopend onderzoek op het gebied van routekeuze en snelheidsbeheersing.

Mogelijkheden voor nationale en internationale samenwerking aan de genoemde onderwerpen dienen nader te worden bestudeerd. Voor een aantal onderwerpen zal gezien hun omvang een dergelijke samenwerking niet alleen wenselijk maar ook noodzakelijk zijn. Naast kennisinstellingen en andere gebruikersgroepen van de modellen worden bij voorkeur ook de ontwikkelaars van de meest gebruikte softwarepakketten in enige vorm bij deze samenwerkingsverbanden betrokken.

## Literatuur

Aarts, L.T. (2004). *Snelheid, spreiding in snelheid en de kans op verkeersongevallen. Literatuurstudie en inventarisatie van onderzoeksmethoden*. R-2004-9. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Abdel-Aty, M., Dilmore, J. & Dhindsa, A. (2006). *Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement*. In: Accident Analysis and Prevention, vol. 38, p. 335–345.

Abdoelbasier, A. (2006). *The Intersection Micro-simulator – Development of a model of driver behaviour on intersections*. 06.34.15/N158/AA/LK. TNO Mobiliteit en Logistiek, Delft.

Antoniou, C., Nowotny, B., Rechbauer, A. & Linauer, M. (2006). *Calibration of DTA models using floating car data: An application of DynaMIT in Vienna*. In: Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation, 4-6 September 2006, Lausanne.

Archer, J. (2001). *Developing micro-simulation for the assessment of safety in relation to Intelligent Speed Adaption*. Centre for Traffic Simulation Research, Royal Institute of Technology, P-100 44 Stockholm.

Archer, J. (2005). *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections*. Doctoral Dissertation. Royal Institute of Technology. Stockholm.

AVV (2002a). *PLATOS Modellenstelsel*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Rotterdam.

AVV (2002b). *Leidraad model- en evaluatiestudies benuttingsmaatregelen*. Opgesteld door Grontmij, Zeist.

AVV (2003). *Handleiding INWEVA-II*. Opgesteld door Goudappel Coffeng, Deventer.

AVV (2004). *Regionale benuttingsverkenner. Verantwoorde keuzes door een betere bereikbaarheid*. Gebruikershandleiding en Introductie RBV versie 1.0. Rijkswaterstaat AVV, Rotterdam

AVV (2005). *Uitbreiding RBV met verkeersveiligheid. Eindrapport*. Opgesteld door Goudappel Coffeng (L.J.J. Wismans en F. Brandt), Deventer.

AVV (2006). *Handleiding BOSS Off-line*. Opgesteld door Goudappel Coffeng (L.J.J. Wismans), Deventer.

Barcelo, J., Casas J., Garcia, D. & Perarnau, J. (2006). *A methodological approach combining macro, meso and micro models for transportation analysis*. In: Proceedings CD-ROM of the 13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London. Paper nr. 2290. Ertico, Brussels.

Ben-Akiva, M.E., Choudhury, C. & Toledo, T. (2006). *Lane changing models*. In: Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation 2006 (ISTS06) 4th-6th September 2006. Lausanne

Bonsall, P., Liu, R. & Young, W. (2004). *Modelling safety-related driving behaviour – impact of parameter values*. In: Transportation Research Part A, vol. 39, p. 425-444.

Chang, J., Oh, C. & Chang, M. (2000). *Effects of traffic condition (v/c) on safety at freeway facility sections*. Fourth International Symposium on Highway Capacity, Hawaii

CROW (1997). *NRM EVV versie 2.0* (Evaluatie verkeer en vervoer). CROW, Ede.

CROW (2006). *Driestrookswegen 1x2+1 – profiel, dynamische simulaties*. Technische rapportage in het kader van de Werkgroep Driestrookswegen. CROW, Ede.

Drolinga, J. (2005). *Het ontwerp van een verkeersveiligheidsindicator van routes*. Afstudeeronderzoek SWOV en Universiteit Twente Civiele Techniek, Enschede

Dijck, T., van (2008). *Een kwestie van kiezen. Een nieuw hiaatacceptatiemodel voor links afslaan op een T-kruising met behulp van simulatie om verkeersveiligheid beter in te schatten*. Afstudeeronderzoek SWOV en Universiteit Twente Civiele Techniek, Enschede.

Dijkstra, A. (1998). *Oriëntatie op kwantitatieve relaties tussen elementen van wegontwerp en indicatoren voor verkeersonveiligheid*. R-98-49. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Dijkstra, A. & Hummel, T. (2004). *Veiligheidsaspecten van het concept 'Bypasses voor bereikbaarheid'. Analyse van het concept van TNO Inro in het perspectief van Duurzaam Veilig*. R-2004-6. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Dijkstra, A & Drolenga, J. (2007). *Verkeersveiligheidsevaluaties van routekeuze; bouwstenen voor een methode gebaseerd op het gebruik van microsимулатiemodellen*. R-2006-19. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Driel, C.J.G. van (2007). *Driver support in congestion: User needs and impacts on driver and traffic flow*. PhD thesis, TRAIL thesis series T2007/10. University of Twente, Enschede.

eIMPACT (2007). *Methodological framework and database for socio-economic evaluation of Intelligent Vehicle Safety Systems (IVSS)*.

Deliverable D3 of the eIMPACT project Socio-economic Impact Assessment of Stand-alone and Co-operative IVSS in Europe. DG-INFSO, Brussels.

eSafety (2006). *Strategic Research Agenda – ICT for Mobility*. eSafety Working Group RTD, eSafety Forum. European Commission DG Information Society and Media, December 2006, Brussels.

Eisele, W.L. & Toycen, C.M. (2005). *Identifying and quantifying operational and safety performance measures for access management; Micro-simulation results*. Report SWUTC/05/167725-1, Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. College Station.

Frejinger, E. & Bierlaire, M. (2006). *Large-scale route choice modelling suitable for traffic simulation*. In: Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation 2006 (ISTS06) 4th-6th September 2006. Lausanne

Gettman, D. & Head, L. (eds.) (2003). *Surrogate safety measures from traffic simulation models*. Siemens Gardner Transportation Systems, Tucson.

Gettman, D. & Pu, L. (2006). *Theoretical validation of Surrogate Safety Assessment Methodology for roundabouts and cross intersections*. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London, Paper nr. 1004. Ertico, Brussels.

Golias, J., Yannis, G. & Antoniou, C. (2001). *Impact of advanced driver assistance systems on urban traffic network conditions*. In: European Journal of Transport and Infrastructure Research, vol.1, nr. 3, p. 277-289.

Goswami, V. & Bham, G.H. (2007). *Gap acceptance behaviour in mandatory lane changes under congested and uncongested traffic on a multilane freeway*. In: Proceedings of the TRB 86<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington.

Goudappel Coffeng (2004). *Lucht voor 10!*. In opdracht van Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer. Kenmerk: AVV491/Okm/8432. Auteurs: M.-J. Olde Kalter & P. van Beek (beide Goudappel Coffeng), J. Vermeulen & Elco den Boer (CE), Hans Erbrink (KEMA). Deventer

Goudappel Coffeng (2006). *Praktijkcase: Regio Alkmaar Beter Geregeld. Een nieuwe stap in netwerkmanagement*. Factsheet HARS-systeem. Auteur: R. Krikke (Goudappel Coffeng). Toegankelijk via: [http://www.goudappel.nl/Site/basicsite.nsf/wwwAssets/0C3466133C64C8FE C1257196004F29EC/\\$file/23%20HARS-LR.pdf](http://www.goudappel.nl/Site/basicsite.nsf/wwwAssets/0C3466133C64C8FE C1257196004F29EC/$file/23%20HARS-LR.pdf). Deventer.

Han, S.K. (2005). *Development of level of safety using fuzzy logic system for rear end collisions based on microscopic driving behaviors*. In: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, Dept. of Civil, Urban and Geo-systems, Engineering, Seoul National University, Seoul, p. 2075-2090.

Hegeman, G. (2000). *Groen licht voor ISA?* Afstudeeronderzoek Civiele Technologie & Management, Kenmerk: XOM003/Hgg/130. Goudappel Coffeng, Universiteit Twente, Enschede.

Hidas, P. (2002). *Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving*. In: Transportation Research Part C, vol. 13, p. 37–62.

Hoetink, A.E. (2003). *Advanced Cruise Control en verkeersveiligheid*. R-2003-24, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Hogema, J.H. (2000). *Driving behaviour in approach manoeuvres: a simulator study*. TNO-rapport TM-00-D001, TNO, Delft.

Hogema, J., Schuurman H. & Tampere, C.M.J. (2000). *ISA effect assessment: from driving behaviour to traffic flow*. In: Proceedings CD-ROM ICTCT workshop Nagoya on Intersection and Network Management, TNO Human Factors, Soesterberg,

Houtenbos, M., Winter, J.C.F. de, Hagenzieker, M.P., Wieringa, P.A., & Hale, A.R. (2006). *Interaction behaviour: Using two linked driving simulators to assess the effect of expectancy*. In: Zuylen, E.J. van (ed.), TRAIL in MOTION: Proceedings of 9th International TRAIL Congress 2006, TRAIL Research School, Rotterdam, p. 129-144.

Immers, L.H., Wilmink, I.R. & Stada, J.E. (2001). *Bypasses voor bereikbaarheid*. Rapport Inro-VV/2001-28. TNO Inro, Delft.

IN-SAFETY (2007). *Improved Micro and Macro Simulation Models*. Deliverable nr. D 3.1 of the EC 6<sup>th</sup> framework IN-SAFETY project. Accessible via [www.insafety-eu.org](http://www.insafety-eu.org)

Jansen, M. (2005). *Modelling van in-car systemen voor snelheidsondersteuning met het microsimulatiepakket Paramics2000*, Stagerapport Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid, SWOV, Leidschendam.

Janssen, S.T.M.C. (2005). *De verkeersveiligheidsverkenner gebruikt in de regio*. R-2005-6, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid, SWOV, Leidschendam.

Jong, R.P. de (2004). *Het effect van Adaptive Cruise Control (ACC) op de doorstroming rond een invoeging. Een verkennende simulatiestudie met het microscopisch verkeersmodel MIXIC*. Afstudeeronderzoek Civiele Technologie & Management, Universiteit Twente uitgevoerd bij TNO, Delft

Katholieke Universiteit Leuven (1998). *Verkeersmodellen*. Cursus H111. Leuven.

Klunder, G., Abdoelbasier, A. & Immers, B. (2006a) *Development of a micro-simulation model to predict road traffic safety on intersections with surrogate safety measures*. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London. Paper nr. 1894. Ertico, Brussels.

Klunder, G., Poelman, M. & Arem, B., van (2006b). *A longitudinal driver model for modelling cooperative road-side and in-vehicle systems with the ITS-modeller*. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on

Intelligent Transport Systems and Services, London. Paper nr. 1667. Ertico, Brussels.

Kraay, J.H., Horst, A.R.A. van der & Oppe, S. (1986). *Handleiding voor de conflictobservatietechniek DOCTOR, Dutch Objective Conflict Technique for Operation and Research*. R-86-3. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Lee, C., Hellinga, B. & Saccomanno, F. (2006). *Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety*. In: Transportation Research Part C, vol. 14, p. 213–228.

Lord, D., Manar, A. & Vizioli, A. (2005). *Modelling crash-flow density and crashFlow-V/C ratio relationships for rural and urban freeway segments*. In: Accident Analysis and Prevention 37 (2005), p. 185-199.

Louwerse, W.J.R. (2003). *ADAS op het onderliggend wegennet; een analyse van de potentiële veiligheidseffecten van ADAS en een simulatiestudie naar de effecten van ISA*. Afstudeeronderzoek bij de sectie Verkeerskunde, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft, Delft.

Louwerse, W.J.R. & Hoogendoorn S.P. (2005). *ADAS Safety Impacts on rural and urban highways*. Pre-print of the Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.

Ma, X. & Andreasson, I. (2005). *Predicting the effect of various ISA penetration grades on pedestrian safety by simulation*. In: Accident Analysis and Prevention 37, p. 1162–1169.

Malone, K. et al (2003). *Traffic simulation and socio-economic assessment of inter-vehicle communication systems in CarTALK*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Madrid. Ertico, Brussels

Marsden, G., McDonald M. & Brackstone, M. (2001). *Towards an understanding of adaptive cruise control*. In: Transportation Research part C, vol. 9, p. 33-51.

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.

Mori, H., Iwase, T. & Kitaoka, H. (2006). *Development of a Traffic Simulator for Evaluating Safety Systems*. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London. Ertico, Brussels.

Morsink, P., Hallouzi, R., Dagli, I., Cseh, C., Schaefer, L., Nelisse, M. & Bruin, D. de (2003). *CarTALK2000: development of a co-operative ADAS based on vehicle-to-vehicle communication*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Madrid. Ertico, Brussels.

Morsink, P.L.J., Dijkstra A. & Wismans L.J.J. (2004). *Preliminary route choice analysis for a sustainably-safe traffic and transport system*. In: Proceedings of the European Transport Conference 2004, 4-6 October, Strasbourg.

Morsink, P.L.J., Goldenbeld, Ch., Dragutinovic, N., Marchau V., Walta, L. & Brookhuis, K. (2008). *Speed support through the intelligent vehicle; Perspective, estimated effects and implementation aspects*. R-2006-25. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Nes, C.N. van, Schagen, I.N.L.G. van, Houtenbos, M. & Morsink, P.L.J. (2007). *De bijdrage van geloofwaardige limieten en ISA aan snelheidsbeheersing: een rijnsimulatorstudie*. R-2006-26. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Nilsson, G. (1981). *The effects of speed limits on traffic accidents in Sweden*. OECD proceedings of the International Symposium on the effects of speed limits on traffic accidents and transport energy use. Dublin.

Nilsson, G. (2004). *Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety*. Thesis Lund Institute of Technology. Bulletin 221. Lund University, Sweden.

NM Magazine (2007). *Verkeersmodellen; toepassingen, ontwikkelingen, wensen*. Hoofdartikel in NM magazine Vakblad voor netwerkmanagement in verkeer en vervoer. vol. 2, nr. 3, oktober 2007.

Olstam, J.J. (2006). *Simulation of vehicles in a driving simulator using microscopic traffic simulation*. In: Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation 2006 (ISTS06) 4th-6th September 2006. Lausanne.

Ortúzar, J., De D. & Willumsen, L.G. (1998). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons Ltd., London.

Poorterman, R., Meijer, M. & Sjoerdsma, R. (2007). *Het hoe en waarom van een (microscopisch) verkeersmodel*. In: Verkeerskundige Werkdagen, 13 en 14 juni 2007, Hilversum.

Poppe, F. (1995). *Risicogegevens in de Evaluatiemodule Verkeer & Vervoer EVV: een bijdrage voor de definitiestudie 'verkeersveiligheid in EVV'*. R-95-21. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

PTV Vision (2005). *VISSIM State-of-the-art Multi-Modal Simulation*. Productbrochure. PTV AG, Karlsruhe.

Ranjitkar, P. et al. (2006). *Advances in microscopic traffic data collection using instrumented vehicles*. Hokkaido University, Sapporo.

Reurings, M.C.B. & Janssen, S.T.M.C. (2007). *De relatie tussen ongevallen en uurintensiteit op provinciale wegen in Gelderland*. R-2006-21. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.



Reurings, M. & Commandeur, J. (2007). *International orientation on methodologies for modeling developments in road safety*. R-2006-34. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

SafetyNet (2007). *Road Safety Performance Indicators: Theory. Deliverable D3.6 of the SafetyNet project*. SafetyNet, European Commission, Brussels.

Schaap, T.W. & Arem, B. van (2006). *An evaluation of behaviour simulation modelling tools for urban intersection driving*, In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> TRAIL Congress, 21 November 2006, Rotterdam, The Netherlands

Schermers, G. & Malone, K.M. (2004a). *Dutch evaluation of chauffeur assistant (DECA). Traffic flow effects of implementation in the heavy goods vehicles sector*. AVV Transport Research Centre, Rotterdam.

Schermers, G. & Malone, K. (2004b). *Evaluating ADA technologies in the Netherlands by means of demonstration projects and micro-simulation modelling*. Accessible via: [www.ictct.org/workshops/05-helsinki/56\\_Schermers.pdf](http://www.ictct.org/workshops/05-helsinki/56_Schermers.pdf). 18<sup>th</sup> ICTCT Workshop. Helsinki.

Schermers, G., Drolenga, H. & Tromp, H. (2008). *Verkeersveiligheid in regionale netwerkanalyses. verkenning van een kwantitatieve analyse in Zuid-Limburg en Stadsregio Arnhem Nijmegen*. R-2007-12. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

SenterNovem (2006). *Duurzaamheidsmodule. Regionale Benuttingsverkenner (RBV), Handleiding versie 1.0*. Opgesteld door Goudappel Coffeng, Deventer.

SMARTTEST (1997). *Review of Micro-simulation models*. Deliverable D3 of the EC 4<sup>th</sup> framework SMARTTEST project University of Leeds, Leeds.

Song, K.H., Chung, S.B., Rhee, S.M. & Kim, S.H. (2005). *Development of level of safety using fuzzy logic system for rear end collisions based on microscopic driving behaviors*. In: Proceedings of the Eastern Society for Transportation Studies, vol. 5, p. 2075-2090.

Tapani, A. (2007). *Analysis of system effects of driver assistance systems by traffic simulation*. In: Proceeding of the Young Researchers Seminar organised by ECTRI, FEHRL and FERSI. Accessible through: <http://www.ectri.org/YRS07/Papiers/Session-5/Tapani.pdf>

Tapani, A. (2008). *Analysis of rumble strips and driver fatigue using traffic simulation*. In: Advances in Transportation Studies, an International Journal. Section B 14. p. 69.

Tate, J., Bell, M. & Papatzikou, E. (2006). *Utilising floating car vehicle data to improve the calibration and validation of traffic microsimulation models*. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London. Paper nr. 1786. Ertico, Brussels.

TRANSUMO (2007). *Jaarrapportage 2006 van het TRANSUMO project Verkeersmanagement - Intelligent Vehicles*. Projectnummer VM04.033

Visser, R. (2005). *Co-operative driving on highways. An assessment of the impact of the advanced driver assistance system 'Co-operative Adaptive Cruise Control' on traffic flow using microscopic traffic simulation*. Nr. 05/7N/141/i500. Afstudeeronderzoek Civiele Technologie & Management, TNO en Universiteit Twente, Enschede

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

Vogiatzis, N. (2003). *On improving traffic micro-simulation techniques. A Research Proposal*. 25th Conference of Australian Institutes of Transportation Research (CAITR), Adelaide, Australia.

Wegman, F. & Aarts L. (red.) (2005). *Door met Duurzaam Veilig. Nationale Verkeersveiligheidsverkenning voor de jaren 2005-2020*. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid. Leidschendam.

Wegman F., Eksler V., Hayes S., Lynam D., Morsink P. & Oppe S. (2005). *A comparative study of the development of road safety in the SUNflower+6 countries, Final Report*. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Wismans, L.J.J. (2003). *Verkeersmodellen. Algemeen. Notitie ter ondersteuning van de modelkeuze. In het kader van het project 'Routekeuze in een wegennet'*. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Yannis, G., Golias J. & Antoniou, C. (2004). *Combining traffic simulation and driving simulator analyses for Advanced Cruise Control system impact identification*. In: *Proceedings of the 83<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington.

Yi, J. & Horowitz, R. (2006). *Macroscopic traffic flow propagation stability for adaptive cruise controlled vehicles*. In: *Transportation Research Part C*, vol. 14, p. 81-95.

Zantema, J. (2007). *A model case study to find the different safety and accessibility effects of Pay-As-You-Drive (PAYD) strategies in the Netherlands*. Afstudeerscriptie, Faculteit Civiele Techniek, Sectie Transport en Planning, TU Delft.

## Selectie van basisbegrippen

### *Verkeersmodel: algemeen*

Verzameling databestanden zoals wiskundige beschrijving van wegen, verkeersaanbod, verkeersdeelnemers en gedragsregels. Met een verkeersmodel worden berekeningen (simulaties) uitgevoerd met daarvoor geschikte software, met als uitkomst de verkeersafwikkeling voor de gemodelleerde situatie. Verschillende typen verkeersmodellen onderscheiden zich in detailniveau en tijdsafhankelijkheid: macro-, meso-, of microscopische modellen; statische of dynamische modellen.

### *Verkeersmodel: macroscopisch*

Gericht op het berekenen van de verkeersafwikkeling op wegvakniveau (verkeersstromen) op basis van relaties tussen de dichtheid en snelheid van het verkeer. Zijn meestal gebaseerd op vloeistofstroomtheorieën.

### *Verkeersmodel: microscopisch*

Gericht op het berekenen van de verkeersafwikkeling als som van de bewegingen van individuele verkeersdeelnemers, die ook als zodanig worden gemodelleerd. Zijn gebaseerd op eigenschappen van voertuigen, ingebouwde systemen en gedrag van verkeersdeelnemers. Uitvoer wordt gegenereerd op het niveau van individuele verkeersdeelnemers en verkeersstromen.

### *Verkeersmodel: mesoscopisch*

Gericht op het berekenen van de verkeersafwikkeling op een geaggregeerd niveau in termen van verkeersstromen, zoals macroscopische modellen. Ook gedetailleerder verkeersgedrag wordt meegenomen, echter niet per individuele verkeersdeelnemer, maar in stochastische grootheden die gelden voor een 'pakketje' voertuigen. Een inhaalmanoeuvre, bijvoorbeeld, wordt gemiddeld geïnitieerd door bepaalde dichtheden en snelheidsverschillen tussen de aangrenzende stroken.

### *Verkeersmodel: dynamisch*

Gericht op het berekenen van de verkeersafwikkeling rekening houdend met veranderingen in de tijd van het verkeersaanbod, verkeersgedrag en beschikbare infrastructuur. De toestand op tijdstip  $t+1$  wordt daarbij berekend op basis van de toestand op tijdstip  $t$ . Alle drie bovengenoemde modeltypen komen in dynamische vorm voor. Microscopische modellen zijn altijd dynamisch.

### *Verkeersmodel: statisch*

Gericht op het berekenen van de verkeersafwikkeling waarbij de interactie tussen verkeersaanbod en beschikbare infrastructuur constant wordt verondersteld in de tijd. Vooral macroscopische modellen komen in statische vorm voor.

*Verkeersmodel: hybride*

Omvat koppelingen tussen verschillende boven beschreven modeltypen. Maakt een iteratieve wisselwerking tussen de verschillende detailniveaus mogelijk.

*Softwarepakket*

Programmatuur (software) waarmee verkeersmodellen worden gebouwd, simulaties (modelruns) worden uitgevoerd, en uitkomsten worden getoond.

## **Selectie van basiscomponenten van een verkeersmodel**

*HB-matrix:*

Herkomst-Bestemmingsmatrix. Tabel waarin het aantal verplaatsingen is vastgelegd tussen gebieden (herkomsten en bestemmingen).

*Bestuurdersmodel*

Verzamelterm voor wiskundige beschrijvingen van verkeersgedrag in (voornamelijk) microscopische modellen, bijvoorbeeld keuze van vervoerswijze, routekeuze, het volgen van voorliggende voertuigen, rijstrookwisseling, hiaatacceptatie (zie hieronder). Wordt vaak in combinatie met voertuigmodellen aangeduid als gedragsmodel.

*Voertuigmodel*

Wiskundige beschrijving van voertuigenkenmerken in microscopische modellen zoals lengte, massa, snelheidsbereik, acceleratie- en remvermogen.

*Hiaatacceptatie*

Heeft betrekking op de hiaten die weggebruikers accepteren om een weg over te steken en de mate waarin dit gedrag verandert indien de wachttijd langer wordt.

*Rijstrookwisselgedrag*

'Verplicht' : noodzakelijk om het juiste vervolg-wegvak te bereiken, zoals bij uitvoegen. 'Vrijwillig': voert een bestuurder uit ter handhaving van de gewenste snelheid, zoals inhalen van een vrachtauto op een snelweg. Een beperkt aantal modellen kan ook inhaalgedrag via de rijstrook van de tegenovergestelde rijrichting simuleren.

*Routekeuzegedrag*

Keuze van weggebruikers van de route tussen herkomst en bestemming en eventuele wijzigingen daarin tijdens de reis, als gevolg van kennis over de actuele verkeerssituatie.

*Voertuigvolggedrag*

Wederzijdse reacties van weggebruikers die elkaar in dezelfde rijrichting volgen, bijvoorbeeld wat betreft volgafstand en snelheid.

*Kencijfer*

Uitdrukking van het risico op een ongeval per afgelegde kilometer (of per passage in het geval van kruispunten). Kunnen nader gedifferentieerd zijn, bijvoorbeeld naar wegtype. Ook wel risicocijfer genoemd.

#### *Afgeleide indicatoren verkeersveiligheid*

Beschrijven risico- en conflictsituaties die een relatie hebben met het ontstaan van ongevallen. Voorbeelden zijn snelheid, volgafstand, time-to-collision (TTC) en varianten daarop. Ook wel surrogate indicatoren genoemd.

#### *APM (Accident Prediction Model)*

Ongevallenmodel dat beoogt letselongevallen te voorspellen op basis van een kwantitatieve relatie met grootheden die de verkeerssituatie beschrijven (zoals intensiteiten, snelheid, wegtypen, wegkenmerken).

#### *I/C-ratio*

Intensiteit/Capaciteit-ratio. Verhouding tussen de wegvakbelasting en beschikbare capaciteit op het betreffende wegvak. Hoe hoger de I/C-ratio, des te groter de kans dat het verkeer op het wegvak niet goed kan worden afgewikkeld.

#### *Monte-Carlosimulatie*

Simulatietechniek waarbij door vele herhalingen, met een andere startwaarde, een verdelingsfunctie wordt verkregen op basis van een representatieve verzameling van data. De techniek wordt in verschillende wetenschappelijke toepassingen gebruikt waar onzekerheden een belangrijke rol spelen.

### **Selectie van toepassingen**

#### *DVM (Dynamisch Verkeersmanagement)*

Verzamelnaam voor het proces, de activiteiten en de (geautomatiseerde) real-timemaatregelen om de verkeersafwikkeling te regelen (zoals verkeerslichten, toeritdoseringen, dynamische route informatie panelen, etc.).

#### *Impact assessment*

Effectbepaling van maatregelen. Hier gebruikt voor veiligheidseffecten van ITS maatregelen.

#### *ITS (Intelligente Transportsystemen)*

Verzamelnaam voor technologische ontwikkelingen waarbij intelligentie in de auto of langs de kant van de weg wordt toegepast ter bevordering van de afwikkeling, veiligheid en het milieu

#### *ADAS (Advanced Driver Assistants Systems)*

Onderdeel van ITS, en een verzamelnaam voor in-voertuigsystemen die de bestuurder ondersteunen in de rijtaak. Betreft hier systemen als ISA/SpeedAlert, navigatiesystemen, ACC, etc.

#### *ISA (Intelligente Snelheidsassistent)*

Vorm van ADAS die de bestuurder helpt bij het kiezen van snelheid. Bestaat in verschillende vormen: van informerend tot automatisch begrenzend. De informerende/waarschuwend variant wordt ook wel SpeedAlert genoemd.

#### *Netwerkanalyse*

Analyse van de verkeerssituatie in elf stedelijke gebieden (ruimtelijke ontwikkelingen en mobiliteitsontwikkelingen) voor de periode 2010-2020,

gericht op de kwaliteit van de verbindingen van deur tot deur en samenhang tussen de modaliteiten, om te komen tot een gebiedsgerichte aanpak met daarin voorstellen voor maatregelen en de programmering daarvan.

*RBV (Regionale Benuttingsverkenner)*

Instrument van de Dienst Verkeer en Scheepvaart (voorheen AVV) ter ondersteuning van projecten Gebiedsgericht Benutten (GGB) voor onder andere effectschattingen van maatregelen. Maakt gebruik van een macroscopisch dynamisch verkeersmodel.

*EVV (Evaluatie Verkeer en Vervoer)*

Evaluatiepakket dat gebruikt kan worden om de resultaten van macroscopische modellen (NRM's) te evalueren, ook wat betreft verkeersveiligheid.

*VMK (VerkeersMilieuKaart)*

Statisch verkeersmodel van een regio, waarmee inzicht wordt verkregen in milieueffecten van maatregelen.

*VVR-GIS (Verkeersveiligheidsverkenner voor de regio)*

Softwareapplicatie op basis van GIS waarmee effecten, kosten en baten van verkeersveiligheidsmaatregelen doorgerekend kunnen worden voor een regio.