

# Micro dynamisch verkeersmanagement

*Het geven van individuele aanwijzingen aan automobilisten ter verbetering van de doorstroming*



Ivo Bouma

---

# Micro dynamisch verkeersmanagement

*Het geven van individuele aanwijzingen aan  
automobilisten ter verbetering van de doorstroming*

---

**Ivo Bouma**

Afstudeercommissie:

Prof. dr. ir. B. van Arem	TU Delft, Transport en Planning (CiTG)
Dr. ir. W. Daamen	TU Delft, Transport en Planning (CiTG)
Ir. P.B.L. Wiggenraad	TU Delft, Transport en Planning (CiTG)
Prof. dr. ir. B. De Schutter	TU Delft, Delft Center for Systems and Control (3mE)

Delft, januari 2011  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Afdeling Transport en Planning

## Voorwoord

Na de afronding van mijn studie Technische Planologie aan de Rijksuniversiteit Groningen wilde ik nog een tweede, meer praktische en technische masteropleiding gaan volgen op het gebied van infrastructuur, verkeer en vervoer. De keuze voor de afstudeerrichting Transport en Planning bij de faculteit van Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft was vervolgens snel gemaakt.

Met de afronding van deze scriptie is een eind gekomen aan mijn masteropleiding Civiele Techniek. Zoals waarschijnlijk elke afstudeerder kan beamen, gaat het afstuderen gepaard met de nodige pieken en dalen. Daarbij heb ik het mezelf niet gemakkelijk gemaakt door tijdens mijn afstuderen enige tijd fulltime te werken bij Rijkswaterstaat. Ondanks de vertraging die dit tot gevolg heeft gehad en de pieken en dalen tijdens de rest van het afstuderen, heb ik echter nooit spijt gehad van mijn beslissing om nog een tweede masteropleiding te gaan volgen.

Deze scriptie was niet tot stand gekomen zonder de begeleiding vanuit de TU Delft en ik wil daarom een aantal personen hartelijk danken. Ten eerste mijn dagelijks begeleider dr. ir. W. Daamen. Dankzij haar kritische blik en adviezen werd ik gestimuleerd om scherp, nauwgezet en gefocust te blijven op mijn afstudeerwerk. Daarnaast wil ik de overige commissieleden prof. dr. ir. B. van Arem, prof. dr. ir. B. De Schutter en ir. P.B.L. Wiggenraad danken voor hun commentaar en opmerkingen tijdens de afstudeerpeilingen. Tot slot wil ik ir. P. Knoppers danken, want zonder zijn aanpassingen aan de software hadden de simulaties niet uitgevoerd kunnen worden.

Uiteraard had ik mijn scriptie niet kunnen maken zonder de steun en het vertrouwen van mijn ouders, zus en vrienden. Ik ben iedereen daar heel erg dankbaar voor en ik beloof dat dit mijn laatste afstudeerscriptie is!

Delft, januari 2011

Ivo Bouma

## Summary

Many studies have been performed to reduce congestion problems in the Netherlands as well as to reduce their environmental impact. Emissions have been reduced over the past decades, but traffic jams still occur on a daily basis, especially on highways. To reduce congestion problems in the Netherlands, dynamic traffic management (DTM) is applied. DTM is a way of making better use of the existing road network's capacity by managing traffic flows. However, present DTM measures are generic measures applied to all vehicles, such as speed limits or overtaking prohibitions.

Technological improvements, such as more accurate positioning systems, and advanced (prediction) models enable a new way of using DTM systems. In this thesis, research has been performed on DTM systems which monitor and analyse individual driving behaviour and transfer specific driving instructions to individual vehicles. The objective of micro dynamic traffic management (MDTM) is to guarantee smooth traffic flows by continuously optimising the road capacity.

Micro dynamic traffic management (MDTM) monitors continuously the exact location of vehicles on a highway and transmits the position to a traffic control centre. The traffic control centre analyses the data and determines, based on the used and unused road sections, whether there is a suboptimal use of the road capacity. When intensity reaches capacity, suboptimal road usage will result to a disturbed traffic flow and to traffic jams. To prevent this, MDTM transmits an individual instruction to a specific vehicle to oppose the suboptimal use of the road capacity.

### Undesirable driving behaviour

Individual driving behaviour may often result in a suboptimal use of the road capacity. For instance, when a truck overtakes another truck with a minor speed difference or when a vehicle is driving with high or irregular speeds. Although this driving behaviour may lead to individual benefits, other vehicles generally suffer the inconvenience. Especially with high intensities the individual benefit does not balance the general interest. Undesirable driving behaviour could result in a decrease of the road capacity and therefore to a reduced traffic flow. In this research, the impact of MDTM is analysed for two specific cases of undesired driving behaviour: large speed differences and platoons hampering merging vehicles from an on-ramp.

The first case of undesired driving behaviour refers to the large speed differences when a vehicle approaches a slower driving vehicle or a traffic jam in the same lane. The vehicle has to rapidly decelerate and upstream vehicles have to brake even harder. These (re)actions will result in a disturbed traffic flow and at high intensities a traffic jam could occur. In reality, a driver can only oversee the traffic several vehicles in front of him but using MDTM it is possible to gain more insight into the actual traffic situation. This enables drivers to anticipate better while approaching slower driving vehicles.

In this particular situation, a vehicle will receive an instruction to reduce its speed when another vehicle within 500 metres ahead drives slower than 60 km/h. The upstream vehicle will decelerate with  $0.50 \text{ m/s}^2$  and will approach the slower vehicle with a lower speed difference. Finally, it has to brake less and therefore its disturbance induced on the overall traffic flow will be kept to a minimum.

To determine the robustness of the parameters, a sensitivity analysis has been executed. Therefore, the distance has been changed from 500 metre to 400 and 600 metres and the speed has been changed from 60 km/h to 50 and 40 km/h.

The second case of undesired driving behaviour refers to platoons hampering merging vehicles from an on-ramp. Merging vehicles hampered by a platoon on the right hand lane have to slow

down to give way to the platoon. Subsequently, they attempt to merge at speeds lower than the ongoing traffic, thereby forcing the upstream vehicles on the main road to decelerate, which results in a disturbed traffic flow.

In this research, it will be checked whether there is a platoon within 900 metres before the merging section and whether this platoon will reach the merging section simultaneously with a merging vehicle. If both assumptions appear, a gap of approximately 75 metres upstream of the platoon is necessarily to be used for the dispersion of the platoon. When these conditions are met, the second vehicle of the platoon will receive an instruction to increase its headway. This causes the platoon to separate, thereby giving the merging vehicle the opportunity to merge at a more appropriate speed. In the end, this simplifies the merging process significantly to the detriment of a small reduction of the use of the right hand lane.

The impact of the parameters in this case of undesired driving behaviour has also been determined by a sensitivity analysis. The effects of MDTM have been assessed with different values of parameters among more compact and more dispersed platoons, a larger gap upstream of the platoon and the possibility to advise platoons in the merging section.

### **Simulation of MDTM**

To assess the performance of applying MDTM in the two cases clarified above, a reference case has been introduced where none of the vehicles will receive an individual instruction. Both the reference case and the two cases of undesirable driving behaviour have been simulated by Fosim. Fosim is a dynamic microscopic simulation tool which has been developed and calibrated to predict traffic flows on multi-lane highways.

Fosim exports an overview of the vehicles with their current position, speed and acceleration. During the simulations with MDTM Matlab will check the conditions for undesirable driving behaviour and which vehicles are concerned. As soon as these conditions are met, a vehicle will receive an individual instruction (either to reduce its speed (case 1) or to increase its headway (case 2)). Matlab exports the vehicle id and its accompanying instruction to Fosim and the simulation continues with the adapted driving behaviour. When undesired driving behaviour does not appear, no instructions are exported by Matlab and the simulation continues normally.

Simulation of the reference case and the two cases of undesirable driving behaviour has been performed on a road section which consists of a 3.5 kilometre two-lane highway with a 2 kilometre single-lane on-ramp. The simulation time corresponds to two hours of real life traffic. During the first thirty minutes the intensity is gradually increased towards the maximum capacity the highway can handle and a traffic jam will finally occur. Halfway the simulation the intensity decreases which solves the traffic jam and induces free flow. Furthermore, the road section is designed on the standards by Dutch main roads, using a speed limit of 120 km/h and no overtaking limitations for trucks.

To obtain statistically reliable results, both the reference case and the two cases of undesirable driving behaviour have been executed for 17 runs. Each run has a different random seed but the seeds are identical for the three simulations so that pairwise comparison between the simulations is made possible.

The comparison of the simulations will be based on traffic flow, average total time delay and traffic flow stability. To compare the traffic flow every thirty seconds the average speed will be gathered for a couple of cross-sections which are located at almost every 250 metre. The cross-section just upstream the merging section creates each run a plot displaying the average speed over the simulation time. Based on these plots, it can be assessed whether individual instructions will aggravate traffic jams or not.

The impact of an instruction on traffic flow and the consequences for travel time will also be assessed by the average total time delay. On average the free flow travel time is 120 seconds, so the total time delay is calculated for all vehicles above the free flow travel time. By the pairwise comparison of the 17 runs it is determined whether there is a significant difference between the average total time delay for the situation with the individual instructions and the average total time delay for the reference case.

Finally, the comparison will be based on the traffic flow stability to draw conclusions about the presence of speed differences and the traffic safety. At the end of the simulation a speedcontourplot generates an overview of the average speeds over time and distance. Based on this plot it can be concluded whether the traffic is travelling smoothly or whether a traffic jam occurs. In addition, the speedcontourplot displays shockwaves, being the result of rapidly accelerating and decelerating vehicles. To assess the effects of individual instructions the number of shockwaves and their average length are computed for all 17 runs of each case. It will be determined whether the individual instructions have decreased the number and average length of the shockwaves, thereby balancing the speed differences and improving the traffic safety.

### Results of MDTM

The reference case shows that 67 percent of the jams were caused by a vehicle merging at a low speed. Due to the presence of a platoon on the right hand lane a merging vehicle is hampered to find a suitable gap and has to decelerate to give way to the platoon. This results in traffic disturbances and finally a jam will occur. The remaining 33 percent of the jams in the reference case were caused by a lack of road capacity (as expected).

The jams in the 17 runs of the reference case result in an average total time delay of 96 hours. In addition, the jams cause a total of 52 shockwaves with an average length of approximately 850 metres. To determine the effects of the two types of undesirable driving behaviour the results have been compared to the reference case.

The simulation of anticipating large speed differences shows a slight difference in the traffic flow. The congestion period seems to be equal to the reference case. However, due to the advised vehicles reducing their speed in advance, free flow speed decreases somewhat earlier. This loss could not be fully compensated for by a larger speed and an improved traffic flow when the average speed reaches to 20 km/h. This loss corresponds to an average total time delay of 104 hours, which is a decrement of 9 percent. Due to a small difference in average total time delay there is no significant difference at a 95 percent level of certainty.

However, the instruction to reduce speed results in a huge improvement of traffic flow stability. The number of shockwaves reduces by nearly 60 percent and their average lengths decrease by more than 40 percent. This decrease in speed differences corresponds with an improved traffic safety.

The sensitivity analyses show an improvement in traffic flow when individual instructions are given at larger speed differences. The average total time delay will decrease by 30 and 20 hours, respectively. However, compared to the reference case, this does not lead to significant differences. In addition, sensitivity analyses show that parameter modifications only have minimal effects on the number and length of the shockwaves.

Conclusively, it can be stated that instructions to anticipate earlier on slower downstream vehicles show a huge safety improvement and a decrease of emissions by reducing speed differences. However, there is no significant improvement of traffic flow.

The simulation of platoons on the right lane hampering merging vehicles shows an improvement of traffic flow. Early instructions to facilitate the merging process result in a delay of congestion of more than 400 seconds. Therefore, vehicles maintain an average speed of about 115 km/h for a longer period of time. However, the instructions result in a decline of the average speed during

congestion to approximately 60 km/h, which is a huge improvement compared to 20 km/h in the reference case.

This improvement of traffic flow conditions during congestion corresponds to a decrease of the average total time delay of 44 hours, which is a decrease of 54 percent compared to the reference case. With a certainty of 95 percent it can be composed that the instructions result in a statistically significant decrease of the average total time delay and therefore result in an improved traffic flow.

In addition, the amount and length of shockwaves decrease by the given instructions. The number of shockwaves over 17 runs decline by almost 50 percent and their average length decline by almost 25 percent.

Finally, the sensitivity analyses do not show further improvements of the results. So, in conclusion, it can be stated that instructions to facilitate the merging process, results in huge improvements in traffic flow and in a decrease of average total time delay. It can also be stated that the individual instructions result in an improved traffic flow stability. As a consequence, traffic safety has been improved and toxic gas emissions have been reduced.

Based on the simulations performed in this research, the conclusion can be drawn that MDTM improves traffic flow, stability and traffic safety to prevent large speed differences and platoons hampering merging vehicles from an on-ramp. Further improvements of micro dynamic traffic management towards research of other kinds of undesirable driving behaviour and the influence of other road configurations and intensities is recommended. Another recommendation is to investigate the impact of the level of compliance, the penetration depth and the reaction time on the results of MDTM. Finally, further research is advised towards the technological implementation of MDTM and the manner of instructions given to the drivers.

## Samenvatting

Vele onderzoeken zijn reeds uitgevoerd om de mobiliteitsproblemen terug te dringen. Daarmee is het deels gelukt om de uitstoot van schadelijke stoffen te reduceren, maar het aantal voertuigkilometers blijft stijgen en de fileproblemen op het Nederlandse hoofdwegennet nemen steeds verder toe. Het overheidsbeleid is de laatste jaren vooral gericht op het beter benutten van de bestaande infrastructuur, het beprijzen van mobiliteit en het bouwen van nieuwe infrastructuur als de knelpunten blijven bestaan. Dit onderzoek richt zich op een nieuwe ontwikkeling voor het beter benutten van de infrastructuur.

De huidige benuttingsmaatregelen betreffen vooral generieke maatregelen die voor alle voertuigen gelden. Echter dankzij technologische ontwikkelingen, betere (voorspellings)modellen en ontwikkelingen op het gebied van telecommunicatie ontstaat de mogelijkheid om verkeersstroomanalyses direct te verwerken en informatie ter verbetering van de verkeersstroom naar een uniek voertuig te versturen. Hierdoor ontstaat een nieuwe toepassing waarbij de beschikbare infrastructuur beter benut wordt door middel van de individuele aansturing van automobilisten, namelijk micro dynamisch verkeersmanagement (MDVM). Het doel van MDVM is om de doorstroming te verbeteren door het geven van individuele aanwijzingen.

Suboptimaal weggebruik van één of enkele automobilisten is vaak de oorzaak van een slechtere benutting van de infrastructuur. Bijvoorbeeld wanneer bij hoge intensiteiten een vrachtwagen met een minimaal snelheidsverschil een andere vrachtwagen inhaalt of wanneer een voertuig onnodig op de middelste of linkerrijstrook blijft rijden. Suboptimaal weggebruik zorgt er voor dat de beschikbare infrastructuur niet optimaal benut wordt en daardoor de doorstroming vermindert.

In dit onderzoek wordt het effect van het geven van individuele aanwijzingen voor twee vormen van suboptimaal weggebruik onderzocht. De eerste situatie betreft het met hoge snelheid naderen van een langzaam voertuig of de staart van een file. Het gevolg is dat het voertuig hard af moet remmen en daardoor de achteropkomende voertuigen nog harder moeten afremmen. Deze verstoring van de verkeersstroom kan uiteindelijk tot een (toename van de) file leiden. Door het voertuig eerder te attenderen op de langzame voorligger zal deze eerder en vooral gelijkmatiger afremmen waardoor het snelheidsverschil geleidelijk kleiner worden.

De tweede situatie betreft voertuigen die tijdens het invoegen belemmerd worden door een platoon op de rechterrijstrook. De voertuigen op de invoegstrook worden gedwongen om hun snelheid te verlagen, het platoon te laten passeren en vervolgens met lage snelheid in te voegen. Door een voertuig in het platoon een aanwijzing te geven zijn volgafstand tijdelijk te vergroten, ontstaat meer ruimte voor invoegende voertuigen en kunnen zij met hogere snelheid invoegen.

Om het effect van de individuele aanwijzingen te bepalen, is een referentiesituatie noodzakelijk waarin geen individuele aanwijzingen gegeven worden. Zowel de referentiesituatie als de twee vormen van suboptimaal weggebruik is met Fosim gesimuleerd. Fosim is een dynamisch en microscopisch simulatiemodel dat ontwikkeld en gekalibreerd is om voorspellingen te doen over verkeersstromen op het Nederlandse hoofdwegennet.

Fosim genereert elke tijdstap een overzicht van de voertuigen met hun actuele positie, snelheid en acceleratie. Tijdens de simulaties controleert Matlab of aan de voorwaarden voor suboptimaal weggebruik voldaan wordt. Zodra aan de voorwaarden voldaan wordt, krijgt een voertuig de aanwijzing om het gas los te laten (situatie 1) of om zijn volgafstand te vergroten (situatie 2). Matlab exporteert het voertuignummer en de bijbehorende aanwijzing naar Fosim en de simulatie vervolgt met de aanpassing. Als er geen suboptimaal weggebruik geconstateerd wordt, worden geen aanwijzingen door Matlab geëxporteerd en gaat de simulatie zonder wijzigingen verder.



De simulatie van de referentiesituatie en de twee vormen van suboptimaal weggebruik zijn uitgevoerd op een tweestrooks autosnelweg met een enkelstrooks toerit. Daarbij is het intensiteitsverloop zodanig gekozen dat file pas op een laat moment ontstaat als gevolg van het te grote verkeersaanbod. Voor zowel de referentiesituatie als de twee specifieke situaties van suboptimaal weggebruik worden telkens 17 simulatieruns uitgevoerd met verschillende randomwaarden om met voldoende statistische betrouwbaarheid conclusies te kunnen trekken. De conclusies worden getrokken op basis van drie beoordelingscriteria, namelijk de doorstroming, de totale verliestijd en de stabiliteit.

De referentiesituatie toont aan dat de doorstroming rustig en gelijkmatig verloopt en er na verloop van tijd geleidelijk file ontstaat. Voor de 17 simulatieruns is aangetoond dat in 67 procent van de simulaties file ontstaat doordat invoegende voertuigen gehinderd worden en daardoor met lage snelheid invoegen. In de overige 33 procent van de runs ontstaat file zoals verwacht doordat de intensiteit groter is dan de capaciteit. De files zorgen er voor dat de gemiddelde totale verliestijd ruim 95 uur bedraagt en dat er in totaal 52 schokgolven met een gemiddelde lengte van ongeveer 850 meter aanwezig zijn.

De aanwijzingen om eerder te anticiperen op langzame voertuigen tonen geen significant verschil in de doorstroming en de totale verliestijd. Doordat voertuigen eerder anticiperen en het gas los laten daalt de gemiddelde snelheid sterker dan in de referentiesituatie, waardoor op dat moment een klein verlies in doorstroming optreedt. Dit verlies wordt echter niet voldoende gecompenseerd door de minder verstoorde verkeersstroom. De gemiddelde totale verliestijd neemt met ongeveer 8 uur toe ten opzichte van de referentiesituatie, maar hierbij is geen sprake van een significant verschil bij een betrouwbaarheid van 95 procent.

De reductie van de snelheidsverschillen leidt echter wel tot een aanzienlijke verbetering van de stabiliteit. Het aantal schokgolven neemt met bijna 60 procent af en de gemiddelde lengte daalt met 40 procent. Dit zorgt voor zowel een verbetering van de verkeersveiligheid als de uitstoot van schadelijke stoffen.

De aanwijzingen ter bevordering van het invoegen leiden tot een aanzienlijke verbetering van de doorstroming en gemiddelde totale verliestijd. De aanwijzingen in het begin van de simulatie zorgen voor een uitstel van het begin van de congestie met ruim 400 seconden. Dit houdt in dat het ontstaan van de file met bijna 7 minuten uitgesteld wordt. Tevens daalt de gemiddelde snelheid tijdens de congestie tot ongeveer 60 km/u, in tegenstelling tot 20 km/u in de referentiesituatie, waardoor de file aanzienlijk korter is. De totale verliestijd neemt met ruim 50 procent af en daarmee is een statistisch significant verschil met de referentiesituatie aangetoond bij een betrouwbaarheid van 95 procent. De afname van de file leidt ook tot een afname van de schokgolven. Het aantal schokgolven neemt met bijna 50 procent af en de gemiddelde lengte daalt met bijna 25 procent. Dit leidt wederom tot een positieve bijdrage aan de verkeersveiligheid en tot een afname van de emissies van schadelijke stoffen.

Op basis van de simulaties voor het bevorderen van invoegende voertuigen kan geconcludeerd worden dat micro dynamisch verkeersmanagement tot een verbetering van de doorstroming, stabiliteit en verkeersveiligheid leidt. De simulaties waarbij eerder geanticipeerd wordt op langzame voertuigen tonen daarentegen geen significant verschil in de verliestijd aan, maar geven wel een duidelijke verbetering in de stabiliteit en verkeersveiligheid.

Vervolgonderzoek naar MDVM dient aan te tonen of individuele aanwijzingen ook in andere verkeerssituaties een positieve bijdrage kunnen leveren. Daarnaast dient de invloed van de penetratiegraad, acceptatiegraad en reactietijd onderzocht te worden op het effect van MDVM. Tot slot dient vervolgonderzoek gedaan te worden naar de technische uitwerking van MDVM en de wijze waarop de aanwijzingen aan de bestuurders getoond worden.

## Inhoudsopgave

Voorwoord.....	I
Summary .....	II
Samenvatting.....	VI
Hoofdstuk 1: Inleiding.....	3
1.1 Individuele aansturing van voertuigen.....	3
1.2 Micro dynamisch verkeersmanagement .....	4
1.3 Onderzoeksvragen .....	4
1.4 Onderzoeksmethodologie .....	5
1.5 Leeswijzer.....	5
Hoofdstuk 2: Mobiliteitsproblematiek .....	7
2.1 Ontwikkeling van de mobiliteitsvraag .....	7
2.2 Externe effecten.....	8
2.3 Oplossingsrichtingen.....	9
Hoofdstuk 3: Betere benutting wegcapaciteit .....	12
3.1 Verkeersstroomtheorie.....	12
3.2 Dynamisch verkeersmanagement.....	14
3.3 In-car systemen .....	16
3.4 Individuele benadering.....	17
Hoofdstuk 4: Micro dynamisch verkeersmanagement .....	19
4.1 Functionele werking van MDVM .....	19
4.2 Verwachte effecten.....	20
4.3 Simulatiepakket voor analyse van MDVM .....	22
Hoofdstuk 5: Functionele beschrijving MDVM in Fosim.....	24
5.1 Fosim .....	24
5.2 Voorwaarden voor geven van aanwijzingen.....	25
5.3 Modelleren van MDVM in Fosim .....	27
Hoofdstuk 6: Opzet simulatie MDVM.....	29
6.1 Invoergegevens.....	29
6.2 Parameterinstellingen van de scenario's .....	32
6.3 Beoordelingscriteria.....	36
Hoofdstuk 7: Resultaten simulatie MDVM.....	40
7.1 Referentiesituatie.....	40
7.2 Anticipatie op langzame voorliggers.....	42
7.3 Invoegen met lage snelheid als gevolg van een platoon .....	45
7.4 Conclusies .....	47
Hoofdstuk 8: Conclusies en aanbevelingen.....	48
Afkortingenlijst .....	51
Literatuur .....	52

---

Bijlage 1: Overzicht verkeersmodellen.....	56
Bijlage 2: Parameterinstellingen Fosim.....	57
Bijlage 3: Bepaling aantal simulaties.....	58
Bijlage 4: Snelheidscontourplot referentie per simulatie.....	59
Bijlage 5: Snelheidsverloop scenario 1 per simulatie.....	62
Bijlage 6: Snelheidscontourplot scenario 1 per simulatie.....	64
Bijlage 7: Snelheidsverloop scenario 2 per simulatie.....	67
Bijlage 8: Snelheidscontourplot scenario 2 per simulatie.....	69

## Hoofdstuk 1: Inleiding

De afgelopen decennia is de mobiliteitsproblematiek steeds verder gegroeid. Het aantal voertuigverliesuren is op het Nederlandse hoofdwegennet (HWN) gedurende de afgelopen twintig jaar bijna verdrievoudigd, waardoor het maatschappelijke verlies als gevolg van files in 2008 ongeveer 3 miljard euro bedroeg (KiM, 2009). Daar het personen- en vrachtverkeer de komende jaren blijft groeien, nemen bij een gelijkblijvende wegcapaciteit de problemen verder toe. Enerzijds zal de filelengte en -duur steeds verder groeien. Doordat automobilisten minder of niet productief zijn op het moment dat ze in de file staan, zal dit tot een steeds grotere maatschappelijke kostenpost leiden. Anderzijds hebben files een negatieve impact op het milieu en de luchtkwaliteit in de directe omgeving van snelwegen. De uitstoot van schadelijke stoffen als CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> leidt tot aantasting van het milieu en verslechtering van de volksgezondheid. In gebieden waar de milieunormen overschreden worden, leidt dit onder meer tot een remmend effect op de ruimtelijke ordening daar nieuwbouwprojecten worden opgeschort (Huisman, 2007).

### 1.1 Individuele aansturing van voertuigen

Om de mobiliteitsproblematiek te verminderen is veel onderzoek verricht naar mogelijke oplossingsrichtingen. Sinds enkele jaren is het overheidsbeleid vooral gericht op het beter benutten van de bestaande infrastructuur, het beprijzen van mobiliteit en het bouwen van nieuwe infrastructuur als de knelpunten blijven bestaan. Aangezien het de afgelopen jaren niet gelukt is om de verkeersgroei in te dammen, is de kernvraag van dit onderzoeksrapport of de bestaande infrastructuur efficiënter benut kan worden. Daardoor is in dit onderzoek het beprijzen en bouwen van nieuwe infrastructuur buiten beschouwing gelaten en is ingegaan op een toepassing voor het beter benutten van de infrastructuur.

Om de beschikbare infrastructuur beter te benutten, is dynamisch verkeersmanagement (DVM) ontwikkeld. Hierbij wordt op basis van de actuele en de verwachte verkeerssituatie de verkeersstroom geïnformeerd, gereguleerd en gefaciliteerd. Het nadeel van de huidige DVM-maatregelen is dat het vooral generieke maatregelen betreft. Dit houdt in dat een maatregel voor alle voertuigen binnen een netwerk geldt en het dus niet mogelijk is om te richten op individuele voertuigen. In de praktijk blijkt echter dat verstorend weggebruik van één of enkele automobilisten regelmatig resulteert in een niet optimale benutting van de beschikbare infrastructuur (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Doordat bijvoorbeeld een automobilist onverwacht remt en het achteropkomende verkeer daar vervolgens op reageert, ontstaat een kettingreactie die bij hoge intensiteit een file tot gevolg kan hebben. Daarnaast kan ook de doorstroming beperkt worden doordat een vrachtwagen met een minimaal snelheidsverschil een andere vrachtwagen inhaalt of doordat een voertuig met hoge snelheid een ander voertuig nadert.

In dit soort situaties leiden generieke DVM-maatregelen tot een beperkt verbeterde benutting van de beschikbare infrastructuur. Door DVM-maatregelen meer toe te spitsen op individuele automobilisten zou in potentie een betere benutting van de wegcapaciteit haalbaar zijn. Dankzij de ontwikkeling van een nieuwe Europese satelliet (Galileo) wordt de positiebepaling veel nauwkeuriger, waardoor het mogelijk is om het gedrag van individuele voertuigen beter te monitoren. In combinatie met betere (voorspellings)modellen en ontwikkelingen op het gebied van telecommunicatie ontstaat de mogelijkheid om de verkeersstroomanalyses direct te verwerken en informatie ter verbetering daarvan naar een individueel voertuig te versturen. Hierdoor ontstaat een nieuwe toepassing waarbij de beschikbare infrastructuur beter benut wordt door middel van individuele aansturing van automobilisten, namelijk micro dynamisch verkeersmanagement (MDVM).

## 1.2 Micro dynamisch verkeersmanagement

Bij micro dynamisch verkeersmanagement krijgen automobilisten een individuele aanwijzing zodra hun gedrag verstoring werkt op de verkeersstroom. Verstoring gedrag is een (re)actie van een automobilist die er voor zorgt dat de beschikbare infrastructuur tijdelijk slechter benut wordt, waardoor vertragingen ontstaan. Voor het rendement van MDVM is het dan ook van belang dat er sprake is van een drukke verkeerssituatie waarbij de intensiteit de capaciteit van de weg benadert. Doordat in deze situaties het verstoring gedrag van een automobilist direct effect heeft op het weggedrag van anderen, leidt suboptimaal weggebruik vrijwel direct tot een verminderde doorstroming en een toename van de verliestijd. Daarnaast wordt het meeste rendement uit de aanwijzingen gehaald als automobilisten zich gedurende langere tijd in een nagenoeg constant verkeerspatroon bevinden. Zodra automobilisten te maken krijgen met verkeerslichten of kruisend verkeer worden zij gedwongen hierop te anticiperen en zal hun verkeersgedrag wederom veranderen. Daarom wordt MDVM alleen toegepast op het Nederlandse hoofdwegennet (HWN).

Zodra vastgesteld is dat het weggedrag van een bestuurder een negatief effect op de benutting van de beschikbare infrastructuur heeft, dient deze bestuurder, of bestuurders van achteropkomende voertuigen, een aanwijzing te krijgen om zijn weggedrag aan te passen. De aanwijzing kan bijvoorbeeld betrekking hebben op de volgafstand, de snelheid of de gekozen rijstrook. Het doel van deze individuele aanwijzingen is om de gevolgen van het suboptimale weggebruik te minimaliseren en daarmee een rustiger en gelijkmatiger verkeersbeeld te creëren. Het is de verwachting dat dit voor een betere benutting van de beschikbare infrastructuur zorgt en daarmee tot een verbetering van de verkeersdoorstroming.

## 1.3 Onderzoeksvragen

Dit onderzoek is een eerste verkenning om vast te stellen in hoeverre MDVM effect heeft op het verbeteren van de doorstroming. Daarbij is in mindere mate aandacht besteed aan de implementatie en de aspecten die bij de uitvoering van MDVM aan de orde komen. Zodra dit onderzoek aantoont dat MDVM potentie heeft, zal een vervolgonderzoek uitgevoerd moeten worden naar de implementatie er van.

Voor de bepaling van het daadwerkelijke effect van MDVM is een aantal onderzoeksvragen opgesteld. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de hoofdvraag en verschillende subvragen. De hoofdvraag die in dit onderzoek centraal staat, luidt als volgt:

*“Wat is het effect van individuele aanwijzingen aan automobilisten op de doorstroming op het Nederlandse hoofdwegennet?”*

De subvragen die van belang zijn voor de beantwoording van de hoofdvraag zijn:

- Hoe ziet de mobiliteitsproblematiek er uit in relatie met MDVM?
- Op welke wijze draagt MDVM bij aan een verbeterde doorstroming op het wegvak?
- In welke specifieke verkeerssituaties op het HWN is er sprake van suboptimaal weggebruik en kan MDVM toegepast worden?
- Welke typen aanwijzingen kunnen daarbij gegeven worden en aan welke voertuigen?
- Op welke wijze kan het effect van MDVM bepaald worden?
- Op basis van welke criteria moet het effect getoetst worden?

## 1.4 Onderzoeksmethodologie

Voordat MDVM daadwerkelijk in de praktijk toegepast kan worden, wordt onderzocht welk effect het geven van individuele aanwijzingen heeft. Daarbij is het effect onder andere afhankelijk van het type aanwijzing en de verkeerssituatie. Ten aanzien van de typen aanwijzingen kan een onderscheid gemaakt kan worden tussen laterale en longitudinale aanwijzingen. Laterale aanwijzingen, zoals rijstrookwisselingen, zijn afhankelijk van veel factoren en daarmee een complex proces terwijl longitudinale aanwijzingen, zoals de gewenste snelheid en volgafstand, beperkt worden door voertuigen in dezelfde rijstrook. Dit onderzoek beperkt zich daarbij tot de longitudinale aanwijzingen.

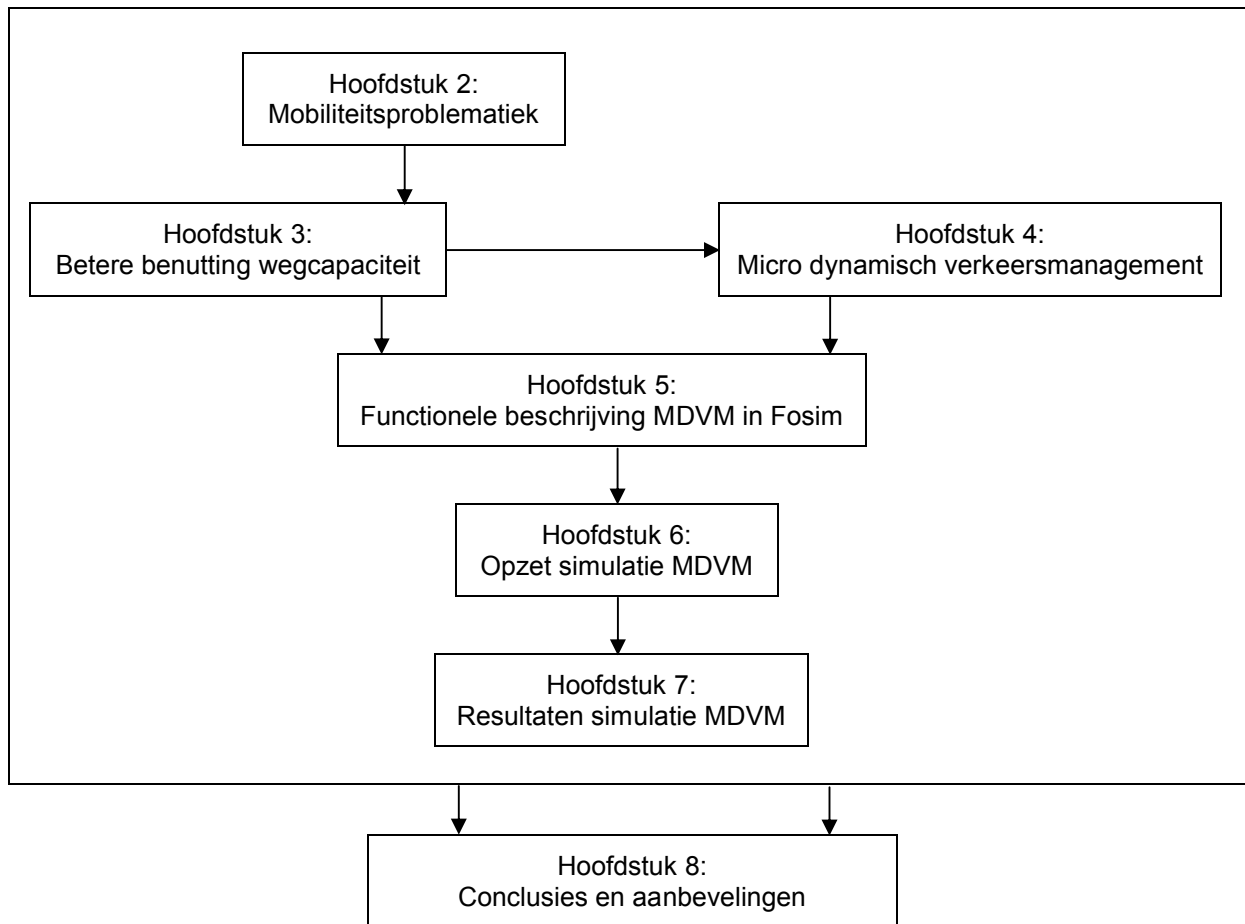
De keuze van het moment waarop besloten worden een specifiek voertuig een aanwijzing te geven, wordt gebaseerd op een aantal variabelen, zoals een bepaald snelheidsverschil of een bepaald gebied waarbinnen de voertuigen zich moeten bevinden. Om de invloed van deze variabelen te onderzoeken, wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij telkens de waarde van één variabele gewijzigd wordt.

Voor de bepaling van het effect van de aanwijzingen en de gevoeligheidsanalyse is het niet mogelijk om een praktijktest uit te voeren. Het effect van MDVM wordt daardoor via simulaties bepaald. De keuze voor het simulatiemodel is afhankelijk van een aantal factoren. De belangrijkste voorwaarde is dat het model het gedrag van individuele voertuigen moet kunnen simuleren. Daarnaast wordt het effect van MDVM bepaald voor enkele wegvakken op het hoofdwegennet, waardoor het simulatiemodel in ieder geval wegvakken of strengen moet kunnen simuleren. Tot slot moet het model gedurende elke tijdstap van de simulatie voertuigen een individuele aanwijzing kunnen geven en moet het effect van de aanwijzing op de verkeersstroom gesimuleerd worden.

Het model simuleert de voertuigen over het wegvak en de individuele aanwijzingen worden uitgevoerd. Daarbij worden de aanwijzingen in dit onderzoek allemaal en direct uitgevoerd om het optimale resultaat van MDVM te verkrijgen en daardoor vast te stellen of het geven van individuele aanwijzingen een positief effect heeft op de doorstroming.

## 1.5 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk worden de mobiliteitsproblemen en -ontwikkelingen van de afgelopen decennia beschreven. Hoe ziet de vraag naar mobiliteit eruit en welke oplossingsrichtingen zijn de afgelopen jaren onderzocht? Hoofdstuk drie bevat de toelichting van de manier waarop de mobiliteitsbehoefte beter gefaciliteerd kan worden, namelijk door de beschikbare infrastructuur beter te benutten. Het daaropvolgende hoofdstuk beschrijft de theoretische onderbouwing en functionele werking van micro dynamisch verkeersmanagement met daarbij de effecten die verwacht worden en het simulatiepakket waarmee MDVM gesimuleerd zal worden. In hoofdstuk vijf wordt de functionele beschrijving van MDVM in Fosim toegelicht. Welke aspecten in Fosim zijn van belang voor MDVM en bij welke voorwaarden wordt een aanwijzing gegeven? Het daaropvolgende hoofdstuk gaat in op de instellingen en parameters die nodig zijn voor de daadwerkelijke simulaties. Tevens worden de criteria beschreven waarmee het effect van MDVM vastgesteld wordt. Hoofdstuk zeven bevat de resultaten van de verschillende scenario's en een beschrijving van de daadwerkelijke effecten van MDVM. Tot slot bevat hoofdstuk acht de conclusies en aanbevelingen die op basis van dit onderzoek getrokken worden. Figuur 1 toont de schematische weergave van de opbouw en de relaties in dit onderzoeksrapport.



Figuur 1: Schematische weergave onderzoek naar micro dynamisch verkeersmanagement.

## Hoofdstuk 2: Mobiliteitsproblematiek

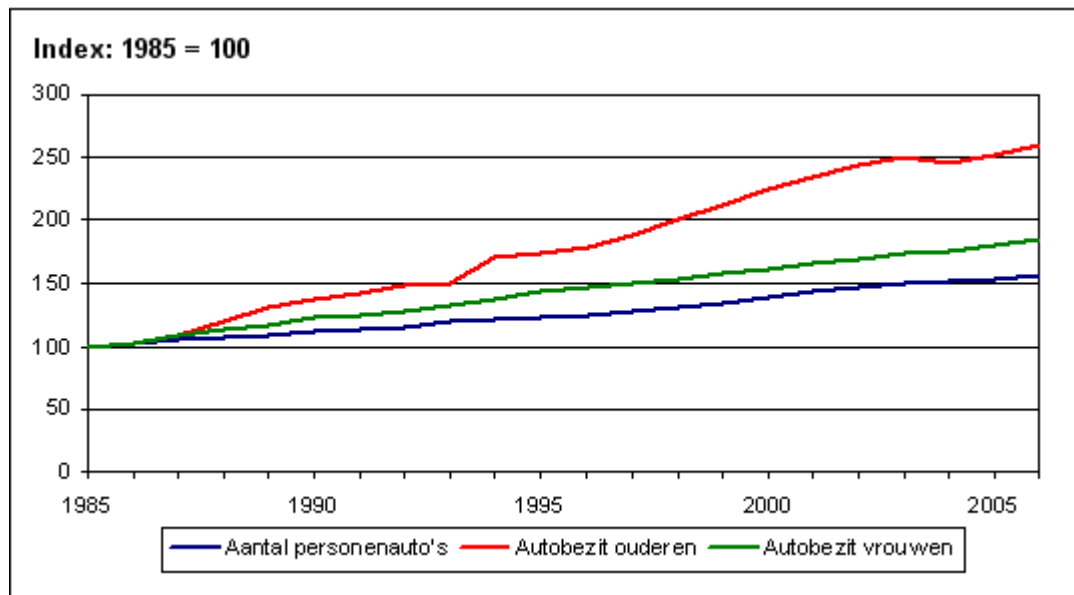
Mobiliteit is ontstaan vanuit de behoefte om (zich) te verplaatsen. Het wordt dan ook vaak gezien als een sociaal goed en een basisvoorwaarde voor economische ontwikkeling en maatschappelijke participatie en ontplooiing (Harms, 2008). Waar eeuwen geleden de bewegingsvrijheid beperkt was, zorgde de industriële revolutie voor een eerste keerpunt. Na de Tweede Wereldoorlog kwam mobiliteit in een stroomversnelling mede doordat de auto veranderde van een product voor de elite tot een massaproduct voor het 'gewone volk'. Ondanks een uitbreiding van de infrastructuur heeft de toename van het aantal auto's er toe geleid dat de beschikbare infrastructuur de vraag nog maar moeizaam kan verwerken. Met name op het Nederlandse hoofdwegennet (HWN) is congestie een dagelijks terugkerend probleem. De belangrijkste oorzaak van de structurele files op het HWN is dat de intensiteit op sommige tijden en locaties groter is dan de capaciteit, zoals bij samenvoegingen van rijstroken en bij knooppunten en aansluitingen (Rijkswaterstaat, 2006). Daarnaast worden files veroorzaakt door incidenten die de capaciteit doen dalen, zoals slechte weersomstandigheden en ongevallen. Volgens het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM, 2009) bedroeg de totaal opgelopen vertraging op het HWN in 2008 bijna 50 miljoen voertuigverliesuren, oftewel een maatschappelijke kostenpost tussen de 2,8 en 3,6 miljard euro. Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste mobiliteitsontwikkelingen van de afgelopen decennia weer. Daarnaast wordt een aantal oplossingsrichtingen beschreven waarmee de afgelopen jaren getracht is de mobiliteitsontwikkelingen in goede banen te leiden. Tot slot wordt het effect van de oplossingsrichtingen bepaald en wordt vastgesteld waar nieuwe oplossingsrichtingen vooral op gericht moeten zijn.

### 2.1 Ontwikkeling van de mobiliteitsvraag

Verkeer is het gevolg van vele verschillende activiteiten die uitgevoerd worden door veel verschillende mensen, waardoor het een onvoorspelbaar en complex karakter heeft. Mensen verplaatsen zich om locaties te bereiken voor bijvoorbeeld sociale of economische activiteiten. Vrachtverkeer wordt veroorzaakt doordat goederen naar een andere fabriek of afdeling vervoerd moeten worden, om vervolgens verder naar de klant getransporteerd te worden. Daarom spelen bij de toename van het personen- en goederenverkeer vooral ontwikkelingen buiten de transportsector een belangrijke rol.

Verschillende onderzoeken (Gwilliam en Geerlings, 1992; Harms, 2003 en Rijkswaterstaat-AVV, 2006) beschrijven een aantal maatschappelijke ontwikkelingen met betrekking tot het personenverkeer, die enerzijds voor een toename van het aantal ritten heeft gezorgd en anderzijds een stijging van de gemiddelde lengte van de rit tot gevolg heeft gehad. De afgelopen decennia heeft een aantal sociaal-culturele ontwikkelingen plaatsgevonden die leiden tot een verandering in de manier waarop het dagelijks leven geordend en ingericht wordt, zoals een toename van het aantal parttimers en meer sociale contacten tussen mensen. Daarnaast zorgt de economische ontwikkeling voor een toename aan toerisme en recreatie. Dankzij de stijging van het besteedbaar inkomen worden meer dagreizen gemaakt en wordt er vaker op vakantie gegaan. Tot slot hebben demografische ontwikkelingen er toe geleid dat het aantal personenauto's sinds 1985 met ruim vijftig procent gestegen is (CBS, 2008c). Naast de toenemende bevolking, kleinere huishoudens en huishoudens met twee auto's wordt deze stijging veroorzaakt door de toename van het autobezit onder vrouwen en ouderen (zie figuur 2).





Figuur 2: Toename aantal auto's en autobezit onder ouderen en vrouwen (CBS, 2008c).

Naast de stijging van het personenverkeer is ook het goederenvervoer de afgelopen decennia aanzienlijk toegenomen. Deze stijging valt volgens Gwilliam en Geerlings (1992) te verklaren door de toenemende mate van automatisering en een flexibeler productieproces, zodat beter voldaan wordt aan de vraag naar meer gevarieerde producten in kleinere hoeveelheden. Door het gevaar van snelle veroudering van producten worden vaker kleine hoeveelheden goederen verplaatst.

Dit heeft ook bijgedragen aan de toename van de goederenoverslag in de Rotterdamse haven. De afgelopen tien jaar is de overslag met ruim dertig procent gestegen, waardoor ook de hoeveelheid vrachtverkeer flink toegenomen is (Port of Rotterdam, 2008).

Op basis van de ontwikkelingen in het personen- en goederenvervoer is het de verwachting dat de komende jaren het aantal verkeersbewegingen verder zal toenemen. Doordat de verplaatsingen met name geconcentreerd zijn tijdens de spitsperioden en in de Randstad, zal vooral daar de bereikbaarheid onder druk komen te staan. Daarnaast heeft de algemene toename van het verkeer ook een aantal externe effecten tot gevolg, die in de volgende paragraaf beschreven worden.

## 2.2 Externe effecten

De mogelijkheid voor personen om zich te verplaatsen en om goederen te vervoeren is een belangrijke factor voor de economische groei en welvaart in Nederland. De toename van het aantal verplaatsingen brengt echter ook een aantal negatieve externe effecten met zich mee. Er ontstaat niet alleen een verlies aan productiviteit, doordat werknemers meer en langer in de file staan, maar de toename van verkeer zorgt ook voor een verslechtering van de verkeersveiligheid, het milieu en de leefbaarheid.

De relatie tussen de verkeersintensiteit en het ongevalsrisico heeft de vorm heeft van een U-kromme (Goudappel Coffeng, 1996). Als het rustig is op de weg bestaat het gevaar dat de aandacht van de automobilist afneemt en is er sprake van een groot ongevalsrisico. Bij een toename van de intensiteit neemt de aandacht toe, en omdat de verkeerssituatie nog overzichtelijk is, daalt het ongevalsrisico. Op het moment dat de intensiteit verder toeneemt, en deze de capaciteit nadert, wordt de verkeerssituatie onoverzichtelijker zodat het ongevalsrisico weer toeneemt. De kans op een aanrijding in de file is dus groter, maar daarbij dient wel opgemerkt te worden dat deze incidenten minder vaak tot (ernstig) letsel leiden aangezien de snelheid lager is.

Ten aanzien van het milieu, de volksgezondheid en de leefbaarheid leidt de mobiliteitsbehoefte tot een aantasting van de leefomgeving, vanwege de hinder van rijdende en geparkeerde voertuigen of door de versnippering van gebieden als gevolg van de (aanleg van nieuwe) infrastructuur. Daarnaast wordt de leefbaarheid aangetast door de uitstoot van schadelijke stoffen en geluidsoverlast. De transportsector is verantwoordelijk voor meer dan vijftig procent van de NO<sub>x</sub>-emissies en voor bijna een kwart van de uitstoot van CO<sub>2</sub> (Van Wee en Dijkstra, 2002). Dit leidt op mondiaal schaalniveau tot klimaatveranderingen als gevolg van het broeikaseffect en tot aantasting van de ozonlaag.

Naast de uitstoot van schadelijke stoffen geldt de transportsector ook als belangrijkste bron van geluidsoverlast in stedelijke gebieden (CBS, 2008a). Geluidsoverlast leidt zelden tot directe onveranderbare schade, maar heeft juist op lange termijn ernstige gevolgen voor de volksgezondheid. Het directe effect op de volksgezondheid is te wijten aan de grotere kans op schade aan de luchtwegen of longziekten.

Het vraagstuk waar de afgelopen decennia veel over gesproken is, is dan ook hoe de welvaartverhogende aspecten van mobiliteit gecombineerd kunnen worden met de negatieve gevolgen die het met zich meebrengt. De volgende paragraaf beschrijft een aantal oplossingsrichtingen waarmee in de afgelopen decennia getracht is de bereikbaarheid te verbeteren en/of de overlast voor het milieu en de leefbaarheid te beperken.

## 2.3 Oplossingsrichtingen

De oplossingsrichtingen die de afgelopen decennia onderzocht zijn, zijn zowel gericht op het terugdringen en beter faciliteren van de verkeersvraag als op het beperken van externe effecten. Daarbij liepen de maatregelen uiteen van technische innovaties tot beleidsmaatregelen op het gebied van infrastructuur en ruimtelijke ordening.

Zoals in de vorige paragraaf beschreven is, is de mobiliteitsvraag vooral afhankelijk van het woon-werkverkeer en de (de)concentratie van voorzieningen zoals scholen, winkels en medische en recreatieve voorzieningen (Geerlings en Hafkamp, 2002). Het overheidsbeleid ten opzichte van de ruimtelijke ordening heeft dan ook een belangrijke invloed op de mobiliteitsvraag. De afgelopen decennia zijn vele trends op het gebied van de ruimtelijke ordening waarneembaar geweest, zoals de suburbanisatie, desurbanisatie en re-urbanisatie in de tweede helft van de vorige eeuw. Zo trokken, als gevolg van onder andere het groeikernenbeleid, tijdens de suburbanisatie vooral de hogere en middeninkomens de stad uit, maar bleven wel in de stad werken waardoor destijds de mobiliteitsvraag sterk toenam (Van der Cammen en De Klerk, 1996). De afgelopen jaren is getracht via concepten als de compacte stad, 'edge city'<sup>1</sup> en 'global village'<sup>2</sup> de voorzieningen meer te concentreren en daarmee de behoefte aan mobiliteit te beperken.

Een andere belangrijke overheidsmaatregel is de keuze voor de realisatie van nieuwe infrastructuur. Er wordt vaak gezegd dat dé oplossing voor het fileprobleem ligt in het aanleggen van meer asfalt. Dat dit in veel situaties niet de oplossing blijkt, komt doordat het enerzijds steeds lastiger wordt om nieuwe infrastructuurle werken aan te leggen. Dankzij de impact op zowel sociaal als milieugebied wordt de aanleg van nieuwe infrastructuur vaak tegengegaan door (lange) bezwaarprocedures van omwonenden. Maar een belangrijkere reden dat de aanleg van een extra rijstrook of een nieuwe rijksweg niet de oplossing is, is de aanwezigheid van de latente vraag. De realisatie van extra asfalt zorgt wel voor een vergroting van de capaciteit, maar dankzij de nog niet vervulde verplaatsingsbehoefte en een verschuiving in de vertrektijden richting de spitsperioden kan deze capaciteitsuitbreiding binnen korte tijd opgevuld worden. Het extra verkeer zal zorgen

<sup>1</sup> De 'edge city' is een concentratie van tertiaire activiteiten zoals theaters, hotels, restaurants en recreatieve voorzieningen buiten de traditionele stedelijke gebieden.

<sup>2</sup> 'Global village' omvat het principe dat de bevolking niet tegengehouden wordt door grenzen of barrières.

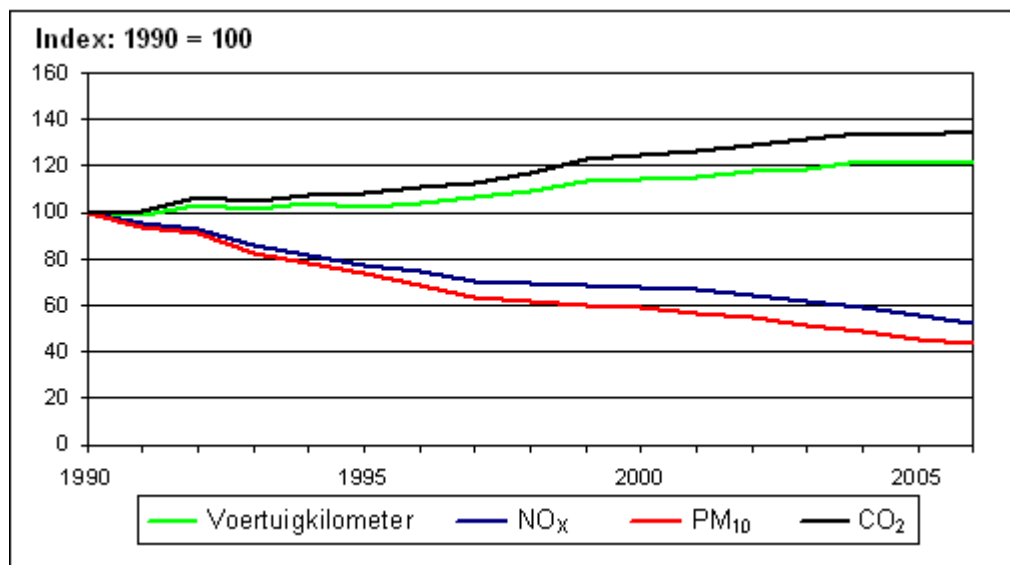
voor een toename van de emissies en geluidsoverlast en het zal extra problemen met zich meebrengen op andere locaties, zoals bij tunnels en bruggen, bij op- en afritten en rond parkeergelegenheden in de stedelijke gebieden.

De overheid heeft ook de afgelopen jaren veel onderzoek verricht naar een prijsbeleid waarmee getracht is de verkeersvraag beter te spreiden door automobilisten te belasten voor het gebruik van hun voertuig naar locatie en tijd in plaats van het bezit er van. Het is onder verschillende namen geprobeerd, 'rekening rijden', 'anders betalen voor mobiliteit' en 'kilometerheffing', maar om verschillende redenen is het (nog) nooit tot een daadwerkelijke realisatie gekomen.

De afgelopen jaren is ook een aantal specifieke maatregelen uitgevoerd die het vrachtverkeer moeten terugdringen. De Betuweroute zorgt bijvoorbeeld voor een verschuiving van het containertransport over de weg naar het transport per spoor. Daarnaast is ingezet op een efficiëntere benutting van vrachtwagens door de introductie van de langere en zwaardere vrachtwagencombinatie (LZV). Doordat een LZV meer vracht kan en mag vervoeren stoot de vrachtwagen minder emissie uit per tonkilometer en leidt het tot een belangrijke afname van het aantal vrachtwagenkilometers (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008).

Tot slot zijn de laatste tijd steeds meer ideeën en innovaties bedacht om de externe effecten van het verkeer te beperken. Veel onderzoek is daarbij verricht naar nieuwe brandstoffen en de reductie van emissies. Door middel van technologische aanpassingen aan motoren wordt het rendement van de brandstof verhoogd en de uitstoot van bijvoorbeeld CO<sub>2</sub> teruggedrongen. Het nadeel is echter dat de kosten erg hoog zijn en dat deze bij de automobilist liggen, terwijl die verder niet de directe gevolgen ten aanzien van het milieu merkt (Gwilliam en Geerlings, 1992). Daarnaast wordt op milieugebied veel vooruitgang geboekt doordat de huidige en eindige brandstoffen, zoals benzine, diesel en LPG, vervangen worden door alternatieve brandstofconcepten, als biobrandstof, waterstof en elektrisch aangedreven motoren (Guikink, 2005). Gezien de vele jaren van onderzoek en ontwikkeling die hieraan vooraf gaan, gaat het bij deze technologische innovaties echter steeds om lange termijn processen.

Op korte termijn stimuleert de (Europese) overheid ook de reductie van de emissies door bijvoorbeeld wetgeving die eisen stelt aan de maximale emissie van nieuwe voertuigen (Van Wee en Dijkstra, 2002).



Figuur 3: Ontwikkeling van het aantal voertuigkilometers en de milieudruk (CBS, 2008b).

De maatregelen die de afgelopen decennia uitgevoerd zijn, hebben vooral een positief effect gehad op het milieu en de leefbaarheid (zie figuur 3). Ondanks de stijging van het aantal voertuigkilometers is de uitstoot van fijnstof ( $PM_{10}$ ) en  $NO_x$  ongeveer gehalveerd. Dit resultaat is met name te danken aan de technologische ontwikkelingen. Wat het aantal voertuigkilometers en de uitstoot van  $CO_2$  betreft, is het echter niet gelukt om de stijging te beperken. Nieuwe oplossingsrichtingen zullen dan ook minder gericht moeten zijn op het terugdringen van de verkeersvraag, maar meer op het beter faciliteren van de grote hoeveelheid verkeersbewegingen. Een belangrijk aspect hierbij is het beter benutten van de huidige infrastructuur op momenten dat er congestie dreigt te ontstaan. Hierdoor kan meer verkeer afgewikkeld worden zodat het aantal files en hun lengte zal afnemen. In het volgende hoofdstuk wordt verder ingegaan op de wijze waarop de huidige infrastructuur beter benut kan worden.

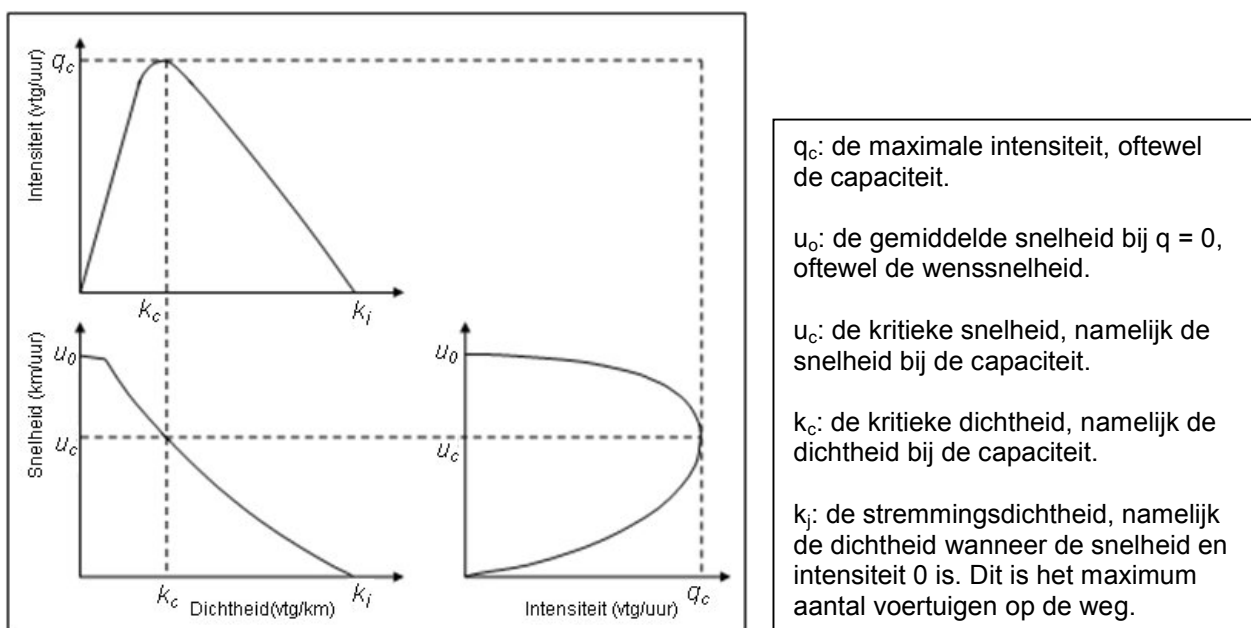
## Hoofdstuk 3: Betere benutting wegcapaciteit

Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven is, is het de afgelopen decennia niet voldoende gelukt om het aantal voertuigkilometers terug te dringen en daarmee de bereikbaarheid te verbeteren. Om de huidige problemen te verminderen is het dan ook vooral van belang om de bestaande infrastructuur beter te benutten. Aangezien automobilisten, bewust en onbewust, er voor zorgen dat de infrastructuur niet optimaal gebruikt wordt, zullen zij hierover geïnformeerd moeten worden. De informatievoorziening kan op verschillende manieren plaatsvinden, zoals via borden langs de kant van de weg of via systemen die zich in het voertuig bevinden. Daarnaast kan de informatie gelden voor alle voertuigen binnen een bepaald gebied of gelden voor speciale doelgroepen of voertuigen.

In de volgende paragraaf wordt aan de hand van verkeersstroomtheorie uiteengezet op welke wijze de wegcapaciteit beter gebruikt kan worden en wat de invloed van suboptimaal weggebruik is. Vervolgens wordt beschreven hoe de betere benutting in zijn werk gaat en welke systemen hiervoor nodig zijn. Tot slot wordt beschreven op welke manier de informatievoorziening het beste plaats kan vinden en voor wie deze informatie beschikbaar moet zijn.

### 3.1 Verkeersstroomtheorie

De verkeersafwikkeling op het hoofdwegennet wordt gekenmerkt door een drietal factoren, namelijk de intensiteit (vtg/uur), de dichtheid (vtg/km) en de gemiddelde snelheid (km/uur). Tussen deze macroscopische variabelen bestaat onder homogene en stabiele omstandigheden een relatie. Het aantal voertuigen dat per tijdseenheid een bepaalde doorsnede passeert ( $q$ ) is gelijk aan het aantal voertuigen over een bepaalde lengte ( $k$ ) vermenigvuldigd met de snelheid ( $u$ ). Met andere woorden  $q = k \cdot u$ , oftewel de *intensiteit = dichtheid • snelheid*. Op basis van  $q = k \cdot u$  kan een drietal aan elkaar gerelateerde functies vastgesteld worden, namelijk een intensiteit-dichtheid diagram, een snelheid-dichtheid diagram en een snelheid-intensiteit diagram, die samen het fundamenteel diagram vormen (May, 1990). Het fundamenteel diagram kan verschillende vormen aannemen, maar voor de principewerking volstaan de drie samenhangende diagrammen zoals in figuur 4 is weergegeven.



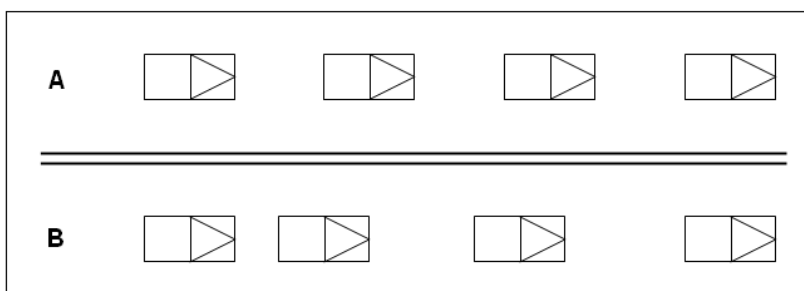
Figuur 4: Fundamenteel diagram met de belangrijkste punten (Hoogendoorn, 2005).

Uit het fundamenteel diagram kunnen ook de verschillende toestanden afgeleid worden waarin de verkeersstroom zich kan bevinden. Zodra de snelheid zelf door de bestuurder gekozen wordt, dus op basis van voertuig-, weers- en bestuurderskarakteristieken en zonder invloed van het overige verkeer, is er sprake van een vrije afwikkelingssituatie en een stabiele verkeersstroom. Wanneer de dichtheid toeneemt, en dus de snelheid afneemt, moeten de automobilisten rekening houden met het overige verkeer en gaat zowel de stabiele fase over in de instabiele fase als de vrije afwikkelingssituatie over in de gedwongen afwikkeling. Als het aantal voertuigen blijft toenemen en de verkeerssituatie verder verslechtert, treedt er congestie op waarbij het verkeer uiteindelijk stil kan komen te staan.

Congestie wordt meestal veroorzaakt doordat op een bepaald moment de intensiteit groter is dan de wegcapaciteit. Echter op het moment dat de capaciteit bijna bereikt is, heeft verstoring weggedrag van een voertuig direct een grote invloed op het weggedrag van andere voertuigen. Dit heeft gevolgen voor de benutting van de beschikbare infrastructuur, waardoor file zal ontstaan terwijl als het verstoring gedrag niet had plaatsgevonden het ontstaan van de file uitgesteld was. De impact van verstoring of suboptimaal weggebruik is dan ook het grootst op het moment dat de wegcapaciteit bijna bereikt wordt.

Zoals uit het fundamenteel diagram blijkt, gaat het bereiken van de capaciteit gepaard met een afname van de snelheid en volgafstand. Zodra een bestuurder even niet oplet en te dicht bij zijn voorganger komt, zal de bestuurder van het achteropkomende voertuig moeten afremmen. Voertuigen stroomopwaarts moeten vervolgens ook afremmen, maar doordat zij iets later reageren dienen zij harder te remmen. Hierdoor ontstaat een kettingreactie die er uiteindelijk toe kan leiden dat een voertuig stil komt te staan. De achteropkomende voertuigen moeten daarvoor afremmen en het gevolg is een vertraging die zich stroomopwaarts als een schokgolf voortplant. Daarbij heeft het voertuig die de kettingreactie in gang zette uiteindelijk weinig vertraging, terwijl het achteropkomende verkeer de meeste hinder ondervindt. Dit is een typisch voorbeeld van suboptimaal weggebruik dat er voor zorgt dat een file eerder ontstaat.

De schokgolven leiden tot een toename van de reistijd doordat alle voertuigen stroomopwaarts van de schokgolf door het verstoorde gebied moeten. Daarnaast zorgen schokgolven voor onveilige situaties als gevolg van de (grote) snelheidsverschillen. Een belangrijke rol bij het ontstaan en weer oplossen van schokgolven is de stabiliteit van de verkeersstroom. Dit geeft aan in hoeverre verstoringen en snelheidsverschillen kunnen worden opgevangen. De stabiliteit is afhankelijk van het weggedrag van automobilisten en wordt beïnvloed door de voorligger, de reactietijd en de gevoeligheid van de bestuurder (May, 1990). In onderstaand figuur is weergegeven dat de stabiliteit niet direct afhankelijk is van de dichtheid en de intensiteit (Elbers, 2005). Voor beide situaties geldt namelijk dezelfde dichtheid en intensiteit, maar een afname van de snelheid van het eerste voertuig zal in situatie A geleidelijker opgevangen worden, waardoor er dus sprake is van een stabielere verkeersstroom.



Figuur 5: Relatie tussen stabiliteit en dichtheid (Elbers, 2005).

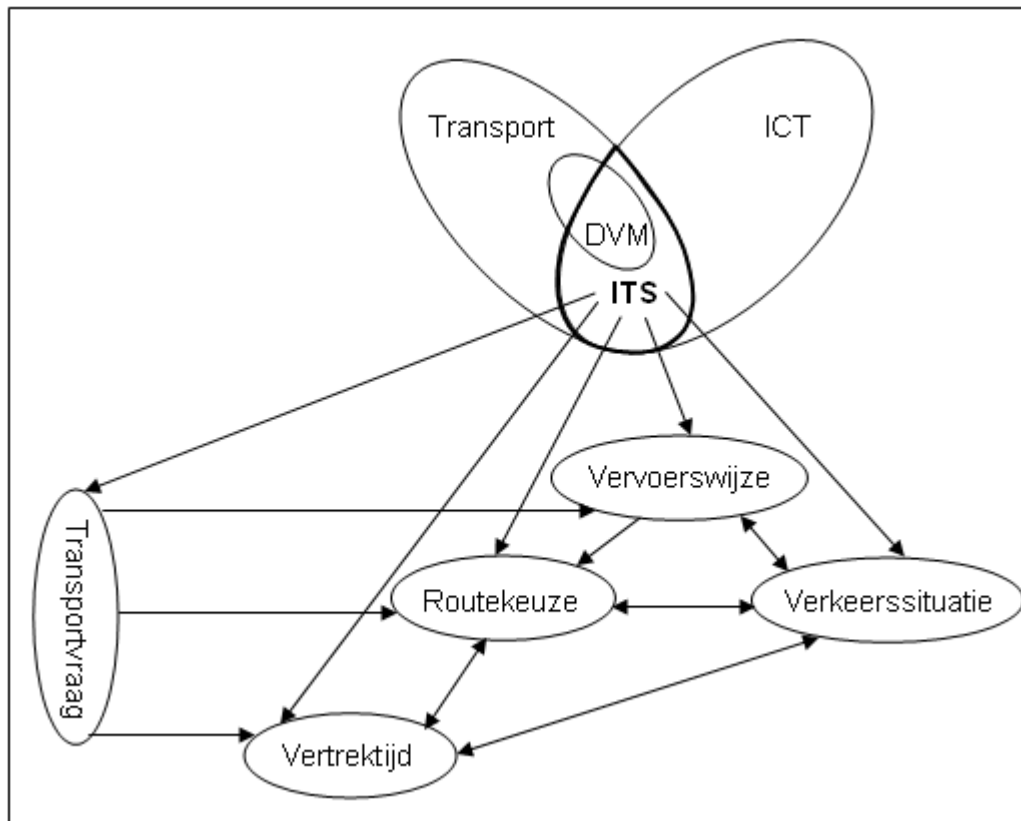
Stabiliteit is ook een belangrijke factor bij platoons, oftewel een aantal voertuigen die dicht achter elkaar rijden, en het effect dat zij hebben op de verkeersstroom. Theoretisch gezien hebben platoons een positief effect op de benutting van de infrastructuur, doordat voertuigen dicht achter elkaar rijden en daardoor minder ruimte in beslag nemen. Dit is ook het geval indien de voertuigen met elkaar kunnen communiceren en daardoor van elkaar weten of de voorligger gaat vertragen en in welke mate. Zodra de bestuurders van de voertuigen in het platoon echter zelf moeten vaststellen of en hoe hard een voorligger remt, ontstaat de situatie dat platoons juist een negatief effect hebben op de benutting van de infrastructuur. Doordat automobilisten te abrupt reageren, ontstaan verstoringen in de verkeersstroom die, zoals eerder beschreven, dus grote gevolgen kunnen hebben voor de doorstroming.

Kortom, het blijkt dat met het terugdringen van suboptimaal weggebruik de huidige wegcapaciteit beter benut kan worden. In de volgende paragrafen wordt beschreven welke ontwikkelingen en factoren daarbij een belangrijke rol spelen.

### 3.2 Dynamisch verkeersmanagement

Dankzij de technologische vooruitgang is de afgelopen jaren de invloed van ICT op het transportgebied steeds verder toegenomen. Nieuwe technologieën komen beschikbaar en daardoor ontstaan nieuwe oplossingsrichtingen om de mobiliteitsproblematiek terug te dringen. De mogelijkheid van ICT heeft geleid tot intelligente transportsystemen (ITS), een verzamelterm voor de toepassing van ICT in transport, voertuigen en infrastructuur. Enerzijds is ITS gericht op het veiliger en milieuvriendelijker maken van het verkeer en anderzijds dienen de ITS-toepassingen het verkeer efficiënter en betrouwbaarder te maken. Zoals in figuur 6 te zien is, heeft ITS invloed op vele verschillende componenten die bepalend zijn voor de totale mobiliteitsvraag en -verdeling.

ITS-systemen die invloed hebben op een veiligere verkeerssituatie en daarmee een afname van het aantal ongevallen en bijbehorende files, zijn bijvoorbeeld het Lane Departure Warning System (LDWS) dat waarschuwt bij het overschrijden van een doorgetrokken streep of het systeem dat de snelheidsverschillen vermindert door de snelheid aan te passen bij een overschrijding van de maximumsnelheid. Een voorbeeld van een ITS-toepassing die invloed heeft op de routekeuze is het dynamische route informatie paneel (DRIP) langs de kant van de weg. Doordat automobilisten geïnformeerd worden over een toegenomen reistijd of een file stroomafwaarts, kunnen zij beslissen om een andere route te volgen. Deze informatie heeft een positief effect voor zowel de individuele automobilist, dankzij een minder lange reistijd, als voor de verliestijd van alle automobilisten samen dankzij de efficiëntere verdeling van de verkeersstromen over het wegennet.



Figuur 6: Invloed ITS op verschillende mobiliteitscomponenten (Naar: Van Zuylen et al., 2006).

Toepassingen van ITS die met name gericht zijn op het efficiënter en betrouwbaarder maken van de verkeersstromen liggen op het gebied van dynamisch verkeersmanagement (DVM). DVM is een verzameling van verkeersbeheersingsmaatregelen die met behulp van dynamische signalen de infrastructuur beter benut (Bovy en Hoogendoorn, 1999). Kenmerkend voor DVM-systemen is dat ze real-time gegevens over de actuele situatie op de weg nodig hebben en deze vervolgens gebruiken bij het optimaliseren van de verkeerssituatie. Dankzij technologische verbeteringen is het de afgelopen jaren eenvoudiger en goedkoper geworden om deze gegevens te verzamelen, waardoor DVM steeds vaker in de praktijk toegepast wordt. DVM-maatregelen hebben niet alleen effect op de verkeersdoorstroming, maar dragen ook bij aan een verbetering van de verkeersveiligheid en het milieu. Zo is uit verschillende onderzoeken (Goudappel Coffeng, 1996; Immers en Westerman, 1996 en Westerman et al., 1998) gebleken dat DVM-maatregelen zorgen voor een rustigere verkeersstroom, waardoor de emissies en het aantal ongelukken afnemen.

DVM-systemen zijn opgebouwd uit een monitoringssysteem voor het inwinnen van de verkeersgegevens en een verkeersmanagementsysteem voor de daadwerkelijke beïnvloeding van de automobilisten (Lambrechtsen en Westerman, 1993). De monitoringssystemen bepalen constant de actuele verkeerssituatie en vervolgens wordt met behulp van die gegevens de verkeerssituatie geoptimaliseerd. Het optimaliseren gebeurt dankzij verschillende beheersingsmaatregelen, zoals (dynamische) snelheidslimieten, het openen of sluiten van spits- of doelgroepenstroken of het instellen van een tijdelijk inhaalverbod. Deze beheersingsmaatregelen worden via de matrixborden boven de weg of via DRIP's langs de kant van de weg aan de weggebruiker kenbaar gemaakt. Voor een optimale werking van DVM-maatregelen is het van belang dat de beheersingsmaatregelen duidelijk naar de weggebruikers gecommuniceerd worden. In de volgende paragraaf wordt beschreven welke mogelijkheden hiervoor beschikbaar zijn en welke gevolgen dit heeft voor de automobilist.



### 3.3 In-car systemen

Onderzoek naar de effecten van ITS-maatregelen toont aan dat de acceptatie van een systeem, en daarmee de effectiviteit, in belangrijke mate afhangt van de wijze waarop het systeem de automobilist informeert of aanstuurt (Draskóczy, 1993; Morsink et al., 2007; Dragutinovic et al., 2005). Veel informatie aan weggebruikers wordt op dit moment aangeboden door middel van elektronische informatie langs de weginfrastructuur, de zogenoemde wegkantsystemen. Wegkantsystemen zijn de (dynamische) portalen in de berm die weggebruikers voorzien van informatie over bijvoorbeeld de maximumsnelheid, een reistijdvergelijking of de filelengte. Deze informatie kan weggebruikers helpen bij het maken van routekeuzes of leiden tot een veilige en comfortabele reis. Wegkantsystemen hebben echter als nadeel dat ze sterk locatiegebonden zijn, waardoor op veel locaties de weggebruikers niet van informatie kunnen worden voorzien. Daardoor wordt de informatievoorziening steeds vaker overgenomen door verschillende in-car systemen. De file-informatie op een DRIP is reeds beschikbaar in de navigatiesystemen en de voorwaarschuwing voor file op matrixborden is bijvoorbeeld overbodig voor voertuigen die uitgerust zijn met adaptive cruise control (ACC).

Een bijkomend voordeel van in-car systemen is dat de communicatie ook tussen voertuigen onderling plaats kan vinden in plaats van alleen maar met het wegkantsysteem. Bij deze coöperatieve systemen communiceren boordcomputers van voertuigen onderling met elkaar en/of met de wegkant, waardoor een netwerk ontstaat waarin informatie snel uitgewisseld wordt. Door gebruik te maken van deze communicatiemethode wordt sneller gereageerd op veranderende condities (Turksma, 2007). Toepassingen hiervan zijn de routeplanners die rekening houden met geplande routes van andere voertuigen zodat het verkeer beter verdeeld wordt of voertuigen die elkaar waarschuwen bij gladheid, slecht zicht of blokkades.

In-car systemen bieden niet alleen de mogelijkheid om de automobilist te informeren, maar ze kunnen ook ondersteuning bieden bij het besturen van een voertuig. Dankzij verschillende bestuurdersondersteunende systemen, ook wel Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) genoemd, krijgen automobilisten de beschikking over systemen die de rijtaken kunnen ondersteunen of zelfs overnemen. Dit moet er voor zorgen dat het besturen van een motorvoertuig veiliger, efficiënter en comfortabeler wordt (Van Arem et al., 2004). Voorbeelden van bestuurderondersteunende in-car systemen zijn onder andere de dode hoek detectie en het systeem dat ingrijpt bij een overschrijding van de maximumsnelheid (intelligente snelheidsaanpassing).

Dankzij verschillende toepassingsmogelijkheden van in-car systemen, zowel informerend als ondersteunend, kunnen de systemen op verschillende manieren ingrijpen in het takenpakket van de bestuurder. Dit kan variëren van systemen die de bestuurder slechts informeren tot systemen waarbij een taak van de bestuurder (deels) overgenomen wordt. Uit testen met een rij simulator naar het effect van intelligente snelheidsaanpassing blijkt dat met een informerende versie het aantal dodelijke ongevallen gereduceerd kan worden met twintig procent, terwijl geschat wordt dat een dwingende versie een reductie oplevert van ongeveer vijftig procent (Van der Horst en Klunder, 2009). De dwingende systemen zijn in het algemeen effectiever, maar hebben als belangrijk nadeel dat ze minder goed geaccepteerd worden dan de informerende systemen (Van Driel en Van Arem, 2006).

Daarnaast geldt voor de informerende systemen dat zij tijdens het moment van de informatievoorziening de automobilist korte tijd afleiden van zijn primaire taak, namelijk het besturen van de auto. Onderzoek van Hancock en Parasuraman (1992), Sheridan (1991) en Verwey (1993) naar de gevolgen van informatievoorziening aan automobilisten heeft aangetoond dat de verkeersveiligheid in het geding komt zodra automobilisten te veel informatie krijgen. Daarbij is de mate van afleiding afhankelijk van de manier waarop de informatie aangeboden

wordt aan de bestuurder. Van der Horst en Steyvers (1994) beschrijven dat visuele boodschappen minder aandacht vergen dan auditieve boodschappen, omdat het luisteren naar een gesproken boodschap langer duurt dan het visueel waarnemen van een aanwijzing. Daarnaast kan de bestuurder bij auditieve boodschappen niet zelf het moment van opnemen bepalen, terwijl dit bij visuele boodschappen wel het geval is. Voor een verkeersveilige werking van de informerende in-car systemen is het dus van belang om informatie alleen aan te bieden zodra de bestuurder tijd heeft om er aandacht aan te besteden.

### 3.4 Individuele benadering

Zoals in de vorige paragraaf beschreven is, neemt het aantal en de mogelijkheden van de in-car systemen steeds verder toe. Een belangrijke ontwikkeling is het steeds autonomer worden van de in-car systemen en het verder overnemen van de functies van de wegkantssystemen. Daardoor ontstaat de mogelijkheid om informatie te specificeren naar en aan te bieden aan individuele automobilisten. Deze individuele benadering kan dan ook een belangrijke rol spelen bij een betere benutting van de wegcapaciteit.

Voor individuele automobilisten is een minimale reistijd vaak belangrijker dan de reistijd voor alle voertuigen in het netwerk. Daardoor handelt een automobilist vaak vanuit individueel belang en wordt niet nagedacht over het versturende effect op de totale doorstroming. Door in een file voortdurend van rijstrook te wisselen kan een minimale individuele reistijdwinst behaald worden, maar het zorgt daarbij eveneens voor een verstoring van de verkeersstroom waardoor het de fileduur kan verlengen. De individuele reistijdwinst leidt dus tot een afname van de totale doorstroming. Een brochure van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007) over de bestrijding van files, beschrijft dat het gedrag van individuele automobilisten een belangrijke factor is bij het ontstaan en voortduren van files. Een drietal tips uit deze brochure zijn in figuur 7 weergegeven en geven aan dat er vaak sprake is van een paradox tussen het bereiken van enerzijds een netwerkoptimum, waarbij een minimale reistijd in het totale netwerk centraal staat, en anderzijds het bereiken van het gebruikersoptimum met daarbij een minimale reistijd voor individuele automobilisten.

**Tip: Blijf bij drukte in uw rijstrook**

*Veelvuldig van rijstrook wisselen vermindert de doorstroming.*

Sommige automobilisten wisselen tijdens de drukte op de snelweg en in files veelvuldig van rijstrook. Hiermee kan soms **individueel** een kleine tijds winst geboekt worden, maar het veroorzaakt extra oponthoud voor **medewegebruikers**.

*Dus blijf bij drukte in uw rijstrook.*

Probeer bij drukte en tijdens files zo veel mogelijk in uw eigen rijstrook te blijven. Hierdoor zullen files minder lang worden en eerder oplossen. En uiteindelijk profiteert iedereen hiervan.

**Tip: Rijdt vlot en gelijkmatig**

*Agressief rijden of juist te passief rijden vermindert de doorstroming.*

Files op de snelweg kunnen ontstaan doordat er niet vlot en gelijkmatig wordt gereden. **Weggebruikers** rijden nu eens te snel en laten dan weer grote gaten vallen. Daardoor moet het **achteropkomend verkeer** veelvuldig afremmen en ontstaan er files.

*Dus rijd vlot en gelijkmatig, zo bevordert u de doorstroming.*

Probeer, bij drukte, vlot en gelijkmatig te rijden. Zo stroomt **alle verkeer** beter door en ontstaan minder files.

**Tip: Ritsen**

*Te snel willen ritsen vermindert de doorstroming.*

Als een snelweg een rijstrook minder krijgt, moet er geritst worden. Veel **automobilisten** willen dan zo snel mogelijk een rijstrook opschuiven. Zij ritsen dan al bij het bord 'Ritsen over 300 meter', terwijl dat pas vanaf 300 meter verderop hoeft. Hierdoor wordt de weg niet efficiënt gebruikt en moet het **andere verkeer** soms onnodig op de rem gaan staan.

*Dus pas uw snelheid aan en rits bij het bord 'Ritsen vanaf hier'.*

Dus als u moet ritsen, doe dat pas vanaf het bord 'Ritsen vanaf hier'. En als u op de naastliggende rijstrook rijdt: geef de ritsers dan de ruimte, dan gaat alles vloeiend en wordt oponthoud zo veel mogelijk beperkt.

Figuur 7: Individueel versus algemeen belang bij filebestrijding (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

Naast het streven naar een (minimale) reistijdwinst voor individuele automobilisten kan het weggedrag van automobilisten ook op een andere manier de doorstroming belemmeren. Zodra automobilisten dicht achter elkaar rijden ontstaat de situatie dat een automobilist te dicht op zijn voorganger komt en daardoor even kort afremt. De achteropkomende voertuigen moeten daardoor ook afremmen, maar doordat zij iets later reageren zullen zij steeds harder moeten remmen. Hierdoor ontstaat een kettingreactie die er uiteindelijk toe kan leiden dat het verkeer stil komt te staan. Daarbij is het zo dat het voertuig die de kettingreactie in gang zette uiteindelijk zonder al te veel vertraging verder kan rijden, terwijl het achteropkomende verkeer de grootste hinder ondervindt. Deze files zonder duidelijke oorzaak, ook wel spookfiles of 'stop en go'-files genoemd, ontstaan vooral in situaties waarbij de verkeersintensiteit erg hoog is (Kerner, 1999).

Aangezien de huidige beheersingsmaatregelen gelden voor alle voertuigen of voor bepaalde doelgroepen, wordt niet specifiek opgetreden tegen de individuen die de doorstroming belemmeren. Bij een dynamische snelheidsbeperking wordt bijvoorbeeld de snelheidslimiet voor alle voertuigen tijdelijk aangepast als gevolg van een onverwachte of wisselende situatie, zoals gevaarlijke weersomstandigheden, drukte of een ongeval. Ondanks algemene regels kunnen individuele automobilisten alsnog een verstoring effect hebben op de totale verkeersdoorstroming doordat zij de minimalisatie van de reistijd belangrijker vinden. Voor de totale verkeersdoorstroming zou het dan ook efficiënter kunnen zijn wanneer alleen de individuele weggebruiker aangesproken wordt op zijn suboptimale weggedrag en niet alle weggebruikers via een algemeen geldende regel. Door alleen specifieke informatie te verstrekken aan de individuele automobilist die de doorstroming verstoort, zou de beschikbare infrastructuur beter benut kunnen worden.

Het volgende hoofdstuk beschrijft een toepassing van het beter benutten van de beschikbare infrastructuur in combinatie met het informeren van individuele automobilisten die de verkeersdoorstroming verstoren.

## Hoofdstuk 4: Micro dynamisch verkeersmanagement

In het vorige hoofdstuk is beschreven dat dankzij technologische ontwikkelingen nieuwe oplossingsrichtingen ontstaan om de mobiliteitsproblemen terug te dringen. De combinatie van het beter benutten van de beschikbare infrastructuur en het daartoe individueel benaderen van automobilisten door middel van een in-car systeem staat in dit hoofdstuk centraal. Bij micro dynamisch verkeersmanagement (MDVM) wordt suboptimaal weggebruik vastgesteld en vervolgens bepaald welk(e) voertuig(en) de nadelige effecten hiervan het beste kunnen compenseren. De individuele aanwijzing die zij krijgen zorgt er voor dat de beschikbare ruimte beter benut wordt en daarmee de doorstromingsproblemen verminderd worden. In dit hoofdstuk wordt de functionele werking van MDVM uiteengezet, gevolgd door een beschrijving van de effecten die van MDVM verwacht kunnen worden. Tot slot wordt beschreven op welke wijze de effecten van MDVM getoetst kunnen worden.

### 4.1 Functionele werking van MDVM

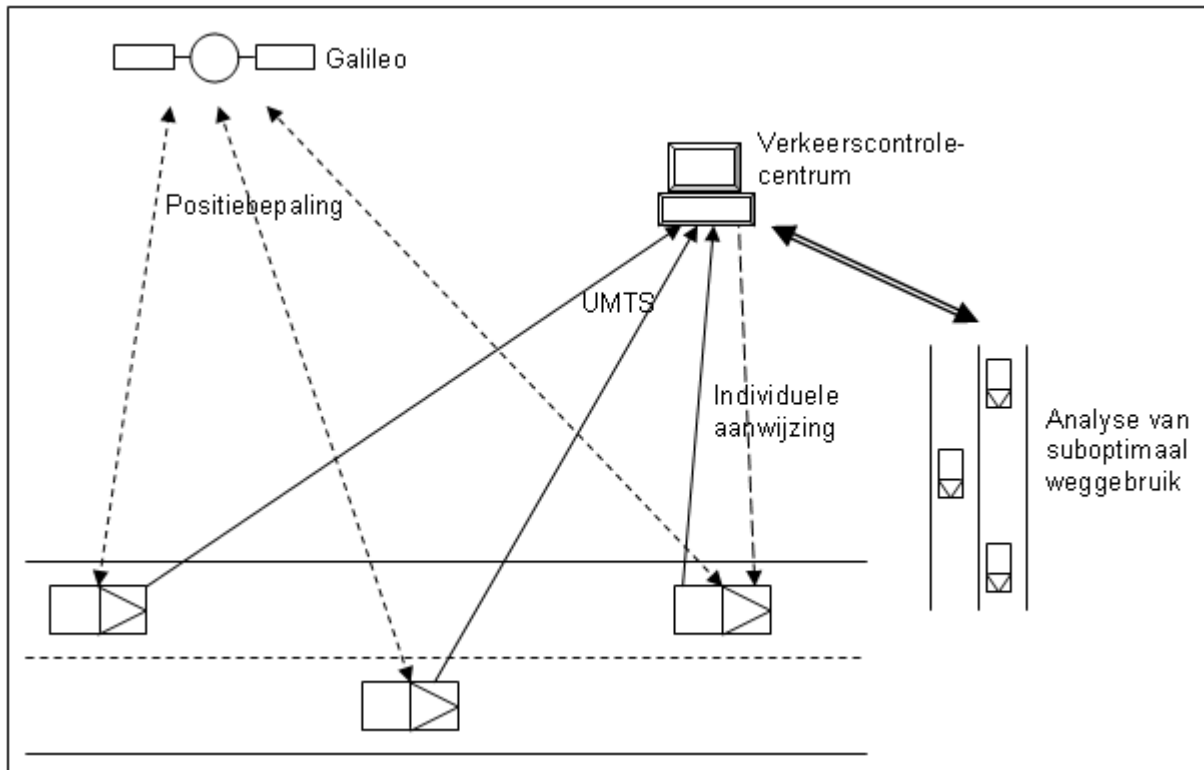
Bij MDVM wordt een betere benutting van het Nederlandse hoofdwegennet nagestreefd door automobilisten die suboptimaal weggedrag vertonen een individuele aanwijzing te geven om hun weggedrag aan te passen. Zo zullen voertuigen die met een hoge snelheid op een file afrijden hard moeten afremmen. Dit kan leiden tot een schokgolf en daarmee een versterking van de file. Door middel van MDVM wordt getracht om beter te anticiperen op suboptimaal weggebruik en daarmee de beschikbare infrastructuur beter te benutten. Dit proces kan onderverdeeld worden in drie fases.

Tijdens de eerste fase wordt bepaald waar de voertuigen zich exact op de weg bevinden. Dankzij de ontwikkeling van Galileo, een Europees satellietplaatsbepalingssysteem als concurrent van het Amerikaanse GPS, ontstaat de mogelijkheid om op zeer nauwkeurig de locatie en rijstrook van alle voertuigen te bepalen (Hein, 2000). Door middel van meerdere positiebepalingen vlak na elkaar wordt de snelheid, richting en acceleratie of deceleratie van elke voertuig bepaald. Vervolgens worden deze gegevens, inclusief de lengte van het voertuig, verzonden naar een verkeerscentrale.

Tijdens de tweede fase worden de voertuigen en hun locatie gecontroleerd op suboptimaal weggebruik. In paragraaf 3.1 is beschreven dat verstoring gedrag van een enkel voertuig tot een file kan leiden op het moment dat de capaciteit van de weg bijna bereikt is. De controle op suboptimaal weggebruik kan niet voorkomen dat het verstoring gedrag optreedt, maar het zorgt er voor dat de negatieve gevolgen voor de doorstroming geminimaliseerd worden. Eerst wordt vastgesteld waar een verstoring van de verkeersstroom ontstaat, zoals een voertuig die te snel zijn voorligger nadert. Vervolgens wordt op zoek gegaan naar onbenutte ruimte op de weg waarmee deze verstoring tegengegaan wordt. Het verstoring voertuig, en voertuigen in de buurt daarvan die het verstoring gedrag kunnen verminderen, krijgen via een aanwijzing door wat er van ze verwacht wordt. Aanwijzingen die gegeven kunnen worden zijn bijvoorbeeld het vergroten van de volgafstand, het eerder afremmen in verband met een langzaam rijdend voertuig stroomafwaarts of het van rijstrook wisselen. In paragraaf 5.2 wordt voor twee specifieke verkeerssituaties beschreven hoe dit exact werkt.

De laatste fase van MDVM bevat het versturen van de aanwijzing. Hierbij kan meegelift worden op de (mogelijke) invoering van de kilometerheffing en de toename van het aantal navigatiesystemen. Bij invoering van de kilometerheffing moeten alle voertuigen voorzien worden van een 'on board unit' (OBU) die bijhoudt waar en op welk moment een voertuig rijdt. Enkele aanpassingen aan deze OBU of aan het navigatiesysteem moeten het mogelijk maken dat niet alleen gegevens verzonden worden, maar dat ook de aanwijzingen over optimaal weggedrag

ontvangen kunnen worden. Daarbij dient opgemerkt te worden dat het voor MDVM niet van belang is om privacygevoelige informatie te versturen. Alleen de aanwezigheid van een voertuig op een bepaalde positie en de bijbehorende voertuiglengte zijn van belang voor de werking van MDVM. In figuur 8 is de functionele werking van micro dynamisch verkeersmanagement schematisch weergegeven.



Figuur 8: Schematische weergave van micro dynamisch verkeersmanagement.

## 4.2 Verwachte effecten

Het is de verwachting dat MDVM meerdere positieve effecten heeft ten aanzien van de mobiliteitsproblemen. De belangrijkste bijdrage wordt verwacht in de verbetering van de doorstroming op het hoofdwegenet. Door de aanwijzingen benutten de voertuigen de ruimte beter op het moment dat er file dreigt te ontstaan, wordt de beschikbare infrastructuur beter gebruikt. Uit het fundamenteel diagram (zie paragraaf 3.1) blijkt dat het verkeer iets langer met een hogere snelheid doorstroomt en dat daarmee het ontstaan van de file uitgesteld wordt. Dit zorgt er voor dat er meer voertuigen per uur doorstromen en de totale verliestijd van alle voertuigen afneemt.

Wanneer echter op individueel niveau naar de verliestijd per voertuig gekeken wordt, ontstaat een verschil in individueel en algemeen belang. Een aanwijzing kan er voor zorgen dat bij sommige voertuigen de verliestijd toeneemt. Doordat de aanwijzing er echter toe leidt dat de infrastructuur beter benut wordt, en daarmee het verkeer stroomopwaarts beter door kan stromen, wordt de toename aan verliestijd voldoende gecompenseerd doordat meerdere voertuigen hiervan profiteren. Uiteindelijk is het de verwachting dat de totale verliestijd afneemt.

Naast een betere doorstroming is het de verwachting dat de aanwijzingen ook bijdragen aan een stabielere verkeersstroom en een toename van de verkeersveiligheid. Doordat geanticipeerd wordt op verstoring weggedrag, zoals het voortdurend optrekken en afremmen, nemen snelheidsverschillen tussen voertuigen af en worden de hiaten beter verspreid over de weg.

Hierdoor verbetert de stabiliteit en neemt het aantal en de lengte van de schokgolven af. De afname van de snelheidsverschillen zorgt er tevens voor dat het aantal en de impact van de ongevallen afneemt.

Tot slot mag verwacht worden dat MDVM ook een positief effect heeft op de afname van de emissies en dus een positieve bijdrage aan het milieu levert. Dankzij de verbeterde doorstroming en het gelijkmatiger rijden, hoeft er minder afgeremd en opgetrokken te worden en neemt het brandstofverbruik en de uitstoot aan schadelijke stoffen af (Spit et al., 2007).

De bovenstaande effecten van MDVM zijn voor een groot deel afhankelijk van de mate waarin automobilisten de aanwijzingen kunnen ontvangen en vervolgens ook willen opvolgen, omdat ze vertrouwen in de werking ervan. Onderzoek naar de effectiviteit van de File-Assistent, een toepassing die waarschuwt bij het naderen van een file, laat zien dat als tien procent van de voertuigen uitgerust is met dit systeem de verliestijd met dertig procent afneemt (Van Driel en Van Arem, 2010). Wanneer echter de helft van de voertuigen over de File-Assistent beschikt, neemt de verliestijd met zestig procent af. Het is de verwachting dat een dussdanig verschijnsel ook bij MDVM op zal treden doordat automobilisten de aanwijzing niet altijd willen of kunnen uitvoeren. Daarnaast is voor MDVM de effectiviteit niet afhankelijk van een combinatie van aanwijzingen, maar een enkele aanwijzing kan al een positief effect hebben. Hierdoor zal MDVM ook al bij lagere penetratie- en acceptatiegraden een positieve bijdrage leveren.

Naast de mate waarin automobilisten de aanwijzingen uitvoeren wordt het effect van MDVM uiteindelijk ook deels bepaald door de snelheid waarmee de aanwijzing opgevolgd wordt. Wanneer automobilisten lange tijd wachten met het uitvoeren van een aanwijzing zal dit de effectiviteit van MDVM negatief beïnvloeden.

Zodra vastgesteld wordt dat MDVM tot een verbeterde doorstroming leidt en het in een geïmplementeerd gaat worden, is het van belang dat er aandacht besteed wordt aan het privacyaspect en de maatschappelijke acceptatie. Zoals in de vorige paragraaf beschreven is, is het voor de werking van MDVM niet van belang om privacygevoelige informatie te versturen. Om de maatschappelijke acceptatie van MDVM te vergroten is het belangrijk dat dit duidelijk gecommuniceerd wordt. Tevens is het van belang dat duidelijk gemaakt wordt dat de maatschappelijke winst van MDVM optimaal is als iedereen de gegeven aanwijzingen ook daadwerkelijk opvolgt. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van Postbus 51 spotjes of andere reclamecampagnes, zoals dat ook met het ritsen gebeurd is.

Voor de implementatie van MDVM moet ook gekeken worden naar de afleiding die ontstaat wanneer een aanwijzing gegeven wordt. Doordat bestuurders korte tijd afgeleid worden van hun primaire taak, namelijk het (veilig) besturen van een voertuig, heeft dit een negatief effect op de verkeersveiligheid. Zoals in paragraaf 3.3 beschreven is, is veel onderzoek verricht naar de effecten van informatievoorziening aan automobilisten. Daaruit is gebleken dat het van belang is dat informatie alleen aangeboden wordt op het moment dat de bestuurder tijd heeft om er aandacht aan te besteden. Door de aanwijzing visueel en zo compact mogelijk weer te geven, is de afleiding van het verkeersbeeld van korte duur en wordt daarmee het negatieve effect op de verkeersveiligheid beperkt. Een toepassing waarmee de afleiding van het verkeersbeeld verder verminderd kan worden is het head-up display<sup>3</sup>. Het geven van een aanwijzing en de uitvoering daarvan, blijft echter een situatie die voor de automobilist niet vanzelfsprekend is, want anders had deze de betreffende actie al eerder uitgevoerd. Daarom dient bij de implementatie van MDVM de nodige aandacht besteed te worden aan de wijze waarop de aanwijzingen gegeven worden.

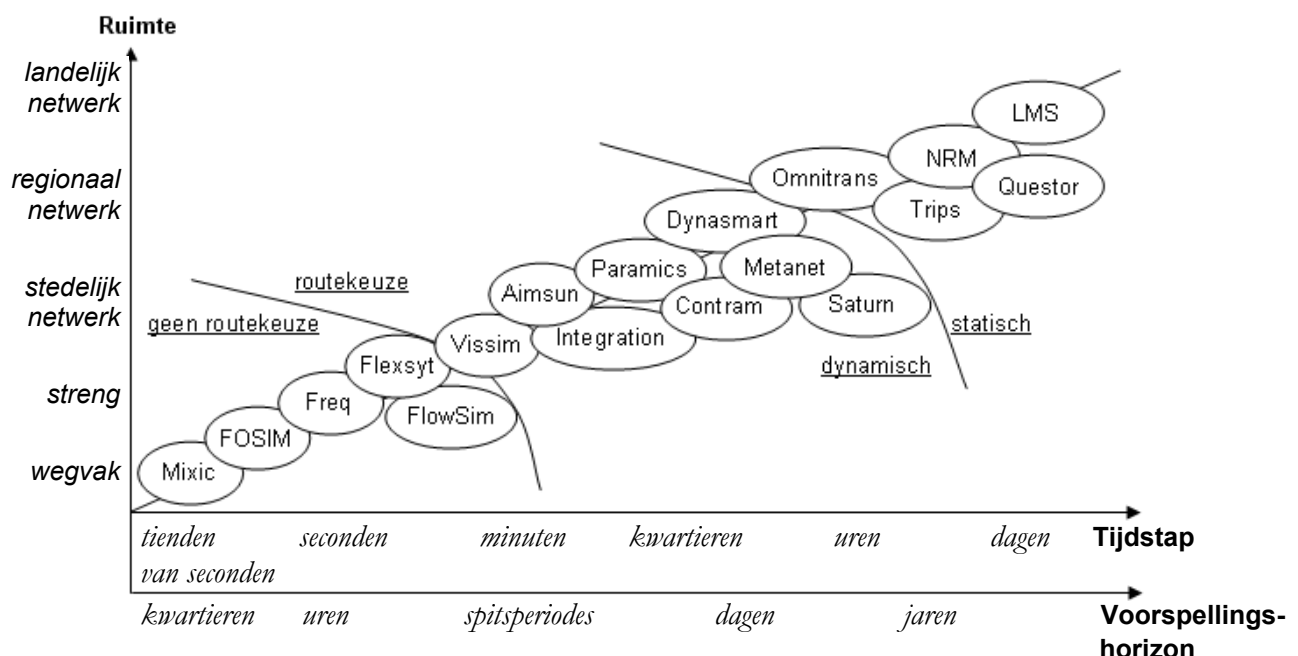
Voordat MDVM daadwerkelijk geïmplementeerd kan worden, dient eerst het effect nauwkeuriger bepaald te worden. In de volgende paragraaf wordt beschreven op welke wijze in dit onderzoek de effecten van MDVM bepaald worden.

<sup>3</sup> Het head-up display is een projectie van de actuele snelheid op de voorruit in het gezichtsveld van de bestuurder.

### 4.3 Simulatiepakket voor analyse van MDVM

Voordat een maatregel daadwerkelijk in de praktijk toegepast kan worden, dienen eerst de effecten gekwantificeerd te worden. Om inzicht te krijgen in het effect van MDVM en de invloed die verschillende factoren daarop hebben, wordt de werkelijkheid nagebootst met behulp van een simulatiemodel. Op basis van de uitkomsten kan bepaald worden of verder onderzoek en uiteindelijk een toepassing in de praktijk zinvol is. Daarbij dient echter opgemerkt te worden dat een model een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid betreft en dat de uitkomsten dus af kunnen wijken van de effecten die in de werkelijkheid behaald worden (Ortúzar en Willumsen, 2001). Aangezien de gedragscomponent binnen MDVM een belangrijke rol speelt, is het met name op dit vlak mogelijk dat een afwijking tussen het model en de werkelijkheid ontstaat. Deze afwijking zorgt er voor dat de uitkomsten van dit onderzoek niet direct voor de praktijk gelden, maar het geeft desondanks een goed beeld of het geven van aanwijzingen aan individuele automobilisten een positief effect heeft op de verkeersstroom.

Er zijn vele verschillende softwarepakketten beschikbaar die zowel door universiteiten als door adviesbureaus ontwikkeld zijn. In figuur 9 is een overzicht gegeven van een aantal verschillende pakketten met daarbij enkele modelkenmerken. Afhankelijk van de manier waarop gemodelleerd wordt, kan een onderscheid gemaakt worden in schaal- en detailniveau. Het schaalniveau geeft inzicht in het toepassingsgebied, oftewel de ruimtelijke schaal waarbinnen het model toegepast kan worden. De ruimtelijke schaal kan uiteenlopen van complete netwerken, een autoweg met eventueel enkele op- en afritten (zogenaamde strengmodellen) tot specifieke kruispunten. Het detailniveau geeft de nauwkeurigheid van het pakket weer, van zeer gedetailleerde modellen op individueel voertuigniveau en tijdstappen van een seconde tot meer algemene pakketten die voorspellingen doen over de verkeersontwikkeling voor een periode van enkele jaren (Grontmij, 2002).



Figuur 9: Overzicht verschillende softwarepakketten (Grontmij, 2002 en CROW, 2008).

Naast het schaal- en detailniveau van het model kan ook een onderscheid gemaakt worden tussen statische en dynamische verkeersmodellen (CROW, 2008). Een statisch verkeersmodel is gericht op een relatief groot wegennet en de resultaten zijn voorspellingen voor de langere termijn. Op basis van gemiddelde intensiteiten over een langere periode kunnen relatieve uitspraken gedaan

worden met betrekking tot verschillende modelvarianten. Een dynamisch model is daarentegen gericht op een kleiner netwerk en daarbij kunnen de intensiteiten die als input gebruikt worden sterk wisselen. De uitkomsten van een dynamisch model betreffen vaak de verkeersafwikkeling van voertuigen per wegvak of het op- en afbouwen van congestie op een bepaalde locatie. Dynamische modellen worden dan ook vooral gebruikt om het effect van een maatregel te bepalen of om de interactie tussen maatregelen te toetsen.

Afhankelijk van de mate van detail dat in het model is opgenomen, kan onderscheid gemaakt worden tussen de micro-, meso- en macroscopische verkeersmodellen (CROW, 2008). Microscopische modellen bevatten verschillende processen en parameters waarmee het gedrag van individuele voertuigen gemodelleerd wordt. De processen bevatten gegevens over onder andere de routekeuze en het rij- en verplaatsingsgedrag, waardoor bijvoorbeeld het voertuigtype, de herkomst en bestemming en de gewenste snelheid van elke individueel voertuig bepaald wordt.

Macroscopische verkeersmodellen zijn gericht om de effecten te onderzoeken ten aanzien van het totale netwerk (Bovy en Hoogendoorn, 1999). Daarbij wordt gebruik gemaakt van geaggregeerde variabelen, waarbij de waarde van de variabele gebaseerd is op meerdere voertuigen. De macroscopische modellen beschrijven meestal de relatie tussen de dichtheid of intensiteit en de gemiddelde snelheid. Mesoscopische modellen bevinden zich tussen de micro- en macroscopische modellen in. Groepen voertuigen worden hierbij als basis genomen voor de afwikkelingsregels van het model.

Op basis van bovenstaande karakteristieken en verschillen tussen de modellen, kan een keuze gemaakt worden voor het softwarepakket waarmee micro dynamisch verkeersmanagement gesimuleerd wordt. Het belangrijkste criterium waaraan het model moet voldoen is de mogelijkheid tot het simuleren van het rijgedrag van individuele voertuigen. Aangezien bij MDVM het gedrag van individuele automobilisten centraal staat, is een microsimulatiemodel noodzakelijk. Daarnaast vindt de simulatie van MDVM slechts plaats op een gedeelte van het hoofdwegennet, waardoor het niet noodzakelijk is om te beschikken over routekeuze en het niet nodig is om het effect voor een compleet netwerk te bepalen. Doordat elk moment van de simulatie aan ieder voertuig een individuele aanwijzing gegeven moet kunnen worden, dient het model dynamisch van aard te zijn waarbij de tijdstappen elkaar snel opvolgen. Tot slot moet het simulatiepakket ook in staat zijn om te kunnen reageren op de aanwijzingen die gegeven worden. Op basis van de bovenstaande voorwaarden en criteria ten aanzien van het softwarepakket, blijkt dat Fosim het meest geschikte pakket is voor de simulatie van MDVM (zie bijlage 1).

Fosim is een microscopisch simulatiepakket dat ontwikkeld is door het 'Laboratorium voor Verkeerskunde' van de TU Delft, in opdracht van de Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van Rijkswaterstaat (Dijker en Knoppers, 2006). Het bevat een verkeersmodel dat gekalibreerd is en toegepast wordt voor het simuleren van verkeer op het Nederlandse hoofdwegennet. Fosim kan twee keer per seconde voor alle voertuigen op een wegvak de positie en voertuigeigenschappen bepalen zoals de snelheid, rijstrook en de gewenste versnelling of vertraging.

Dit hoofdstuk heeft de theoretische werking van MDVM uiteengezet en beschreven dat de effecten gekwantificeerd worden door middel van simulaties. Voordat deze simulaties uitgevoerd kunnen worden, dient een aantal aspecten beschreven te worden omtrent de toepassing van MDVM in Fosim. Wanneer is er sprake van suboptimaal weggebruik, welke voertuigen krijgen een aanwijzing en wat is de inhoud van de aanwijzing? Het volgende hoofdstuk bevat de functionele beschrijving van MDVM in Fosim en op welke wijze de simulaties van MDVM plaatsvinden.

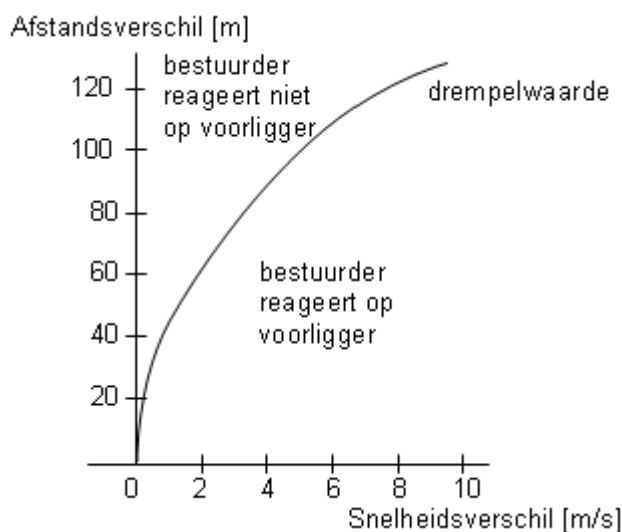


## Hoofdstuk 5: Functionele beschrijving MDVM in Fosim

In het vorige hoofdstuk is beschreven dat het effect van MDVM gekwantificeerd wordt op basis van simulaties met Fosim. Het voordeel van Fosim is dat het specifiek gericht is op hoe bestuurders zich gedragen op bepaalde wegvakken van autosnelwegen. Daarbij is het mogelijk om de uiteindelijke verkeersafwikkeling zowel op micro- als op macroniveau nauwkeurig te volgen en achteraf te analyseren. In dit hoofdstuk wordt de functionele werking van Fosim toegelicht voor de analyse van MDVM. De volgende paragraaf bevat een algemene beschrijving van Fosim en op welke wijze de interactie tussen voertuigen plaatsvindt. Vervolgens wordt beschreven wanneer bij de interactie tussen voertuigen sprake is van suboptimaal weggebruik en worden de twee verkeerssituaties beschreven waarvoor MDVM gesimuleerd wordt. Onder andere de voorwaarden waarop het verkeersbeeld in deze situaties getoetst wordt en de exacte aanwijzingen die hierbij gegeven worden komen aan de orde. De laatste paragraaf bevat een overzicht van de implementatie van de simulatie van MDVM. Welke aspecten komen naar voren bij achtereenvolgens het genereren van de uitvoer van een simulatiestap, de analyse op suboptimaal weggebruik, het eventueel geven van aanwijzingen en de bepaling van de invoer voor de nieuwe simulatiestap.

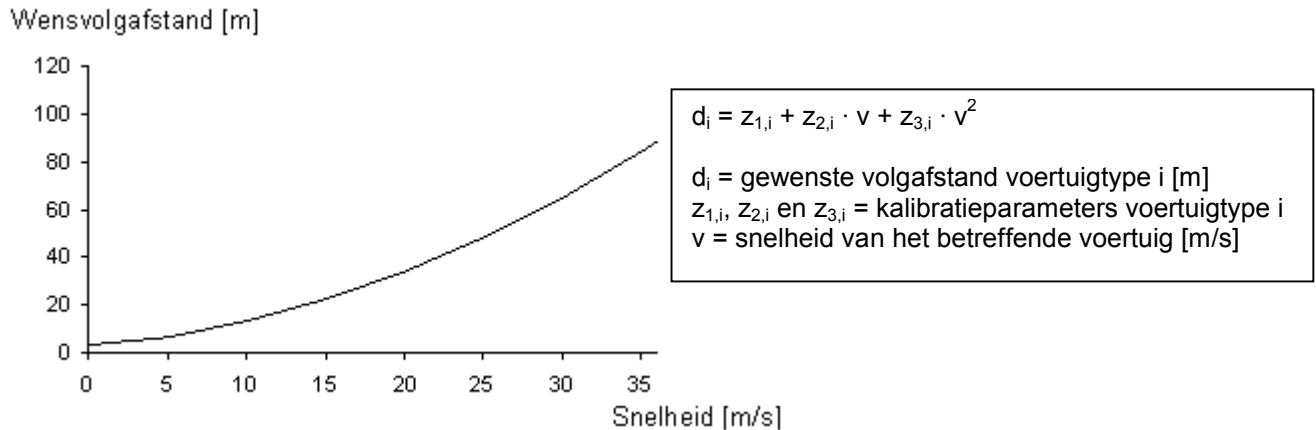
### 5.1 Fosim

Fosim is een microscopisch simulatiemodel dat individuele voertuigen over een wegvak simuleert. Indien een voertuig niet belemmerd wordt door het overige verkeer zal de snelheid van een voertuig gelijk zijn aan de wensnelheid. Zodra stroomafwaarts een voertuig met een lagere snelheid rijdt, zal het achteropkomende voertuig afremmen en vervolgens op een gewenste volgafstand gaan volgen. Dit volggedrag is afhankelijk van het snelheids- en afstandsverschil tussen beide voertuigen (Dijker en Knoppers, 2006). Bij een groter snelheidsverschil reageert een bestuurder logischerwijs eerder dan bij een kleiner snelheidsverschil. Daarnaast heeft de (beperkte) menselijke waarneming invloed op het moment van snelheidsaanpassing. Op grotere afstand is het snelheidsverschil met een voorligger lastiger in te schatten dan op kortere afstanden. Voertuigen zullen hun snelheid aanpassen aan de snelheid van een voorligger indien een bepaalde perceptiedrempel overschreden wordt. Deze drempelwaarde is door Wiedemann (1974) beschreven en is weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 10: Perceptiedrempel ten aanzien van snelheidsaanpassing (Wiedemann, 1974).

Indien een voertuig in Fosim een tragere voorligger nadert, zal deze passief remmen door het gaspedaal los te laten. Dit resulteert in een remvertraging van  $-0,50 \text{ m/s}^2$ . Deze remvertraging wordt aangehouden totdat de gewenste volgafstand bereikt is. Figuur 11 bevat de relatie tussen de gewenste volgafstand en de snelheid (Dijker en Knoppers, 2006). In situaties waarin een aanrijding dreigt, zal logischerwijs tijdelijk een grotere remvertraging en een kleinere volgafstand geaccepteerd worden.



Figuur 11: Relatie tussen de snelheid en de wensvolgafstand (Dijker en Knoppers, 2006).

Wanneer de wenssnelheid veel groter is dan de snelheid van de voorligger, en op de rijstrook links van beide voertuigen voldoende ruimte is, zal het achteropkomende voertuig in gaan halen. Afhankelijk van de voertuigen op de linkerrijstrook bepaalt Fosim of een versnelling of vertraging noodzakelijk is om de strookwisseling veilig te laten verlopen. Uiteindelijk wordt de strookwisseling alleen uitgevoerd indien geen van de voertuigen te hard moet remmen. De remvertraging die daarbij nog als acceptabel beschouwd wordt, is afhankelijk van de actuele snelheid; hoe lager de snelheid, hoe harder een bestuurder bereid is te remmen. Daarbij dient opgemerkt te worden dat bestuurders nooit onmiddellijk (kunnen) reageren, maar pas na een bepaalde reactietijd. In Fosim is dit opgenomen door een tijdsverschil tussen het moment waarop besloten is te versnellen of te vertragen en het daadwerkelijk uitvoeren daarvan.

De bovenstaande bepaling van de wensvolgafstand geldt echter niet bij strookwisselingen, doordat voertuigen dan tijdelijk kortere volgafstanden accepteren. Na een periode van ongeveer twintig tot dertig seconden, de zogenaamde relaxatieperiode, is het hiaat hersteld tot de gewenste volgafstand (Laval en Leclercq, 2008).

Voor MDVM is name deze interactie tussen voertuigen in Fosim van belang. De volgende paragraaf beschrijft het ontstaan van suboptimaal weggebruik, met daarbij enkele praktijksituaties en geeft aan met welke aanwijzingen deze negatieve gevolgen geminimaliseerd kunnen worden.

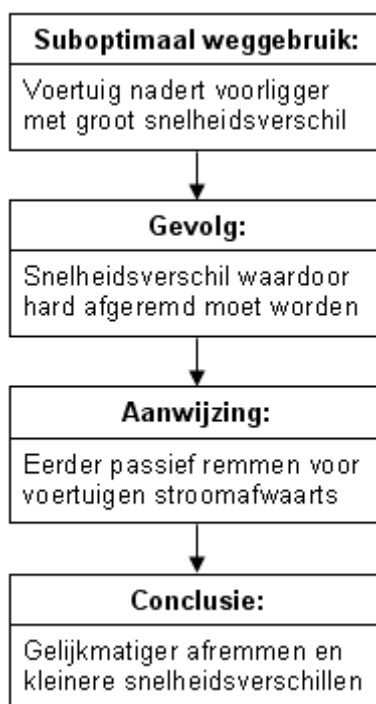
## 5.2 Voorwaarden voor geven van aanwijzingen

Zoals in hoofdstuk drie beschreven is, is in het verkeer regelmatig sprake van een paradox tussen het individueel en algemeen belang. Wat voor individuen een afname van de reistijd oplevert, kan juist voor de totale doorstroming negatieve gevolgen hebben. Met deze paradox is de basis gelegd van suboptimaal weggebruik, waarbij het gedrag van één voertuig negatieve gevolgen heeft op de totale benutting van de beschikbare infrastructuur.

Suboptimaal weggebruik is vaak het gevolg van bewust gedrag van automobilisten waarmee zij een kleine reistijdwinst willen behalen. Hierbij kan gedacht worden aan het veelvuldig van rijstrook wisselen, vrachtwagens die met een minimaal snelheidsverschil elkaar inhalen, te lang doorrijden bij het invoegen of ritsen en het rijden met hoge snelheden. Suboptimaal weggebruik

kan echter ook het gevolg zijn van onbewust gedrag van individuele automobilisten. Bijvoorbeeld wanneer niet goed opgelet wordt bij het uitvoegen en daardoor te weinig automobilisten gebruik maken van de dubbele uitvoegstrook, door te lang links te blijven rijden of dankzij onregelmatig en ongelijkmatig weggedrag als gevolg van bellen of het instellen van het navigatiesysteem. Uit deze voorbeelden blijkt dat het regelmatig voorkomt dat individueel gedrag tot een slechtere benutting van de infrastructuur leidt. Niet in alle situaties leidt dit vervolgens ook tot een verminderde doorstroming, maar wanneer de capaciteit bijna bereikt wordt, kan dit de reden zijn dat file eerder optreedt.

Voor de analyse van MDVM is onderzoek gedaan naar twee verkeerssituaties waarbij de beschikbare infrastructuur nog niet volledig benut is, maar waarin toch regelmatig doorstromingsproblemen ontstaan. De eerste verkeerssituatie heeft betrekking op voertuigen die met onnodig grote snelheidsverschillen langzamere voorliggers naderen en de tweede situatie betreft het hinderen van invoegende voertuigen door een platoon terwijl achter het platoon ruimte beschikbaar is.



Figuur 12: Oorzaak en gevolg van een aanwijzing om eerder te anticiperen op tragere voorliggers.

### Anticipatie op langzame voorliggers

Het blijkt dat automobilisten vaak laat reageren en daardoor onnodig hard afrijden op tragere voertuigen. Hierdoor moeten ze uiteindelijk hard afremmen, waardoor achteropkomende voertuigen vervolgens nog harder moeten remmen. Zoals in paragraaf 3.1 besproken is leiden deze (re)acties tot een onrustig verkeersbeeld, schokgolven en in sommige gevallen tot files.

In de praktijk kan een bestuurder slechts enkele voertuigen vooruit kijken, maar met MDVM is het mogelijk om veel verder vooruit te kijken en daarmee veel eerder te anticiperen op langzaam rijdende voertuigen. Zodra geconstateerd wordt dat een voertuig zijn voorliggers snel nadert, wordt een aanwijzing gegeven om het voertuig te attenderen op de tragere voorliggers. De aanwijzing die daarbij gegeven wordt is om het gaspedaal los te laten en daarmee passief te remmen. Hierdoor remt het voertuig eerder en vooral gelijkmatiger af en wordt het snelheidsverschil geleidelijk kleiner. Figuur 12 bevat de schematische weergave van het eerder anticiperen op tragere voorliggers.

Het is uiteraard niet de bedoeling dat het voertuig blijft afremmen op het moment dat het suboptimale weggebruik niet meer aanwezig is. Daarom wordt een tweede aanwijzing gegeven om het oorspronkelijke weggedrag te herstellen als er geen

sprake meer is van een langzamer voertuig of als het voertuig zijn voorligger aan het volgen is.

### Invoegen met lage snelheid als gevolg van een platoon

De tweede verkeerssituatie die in dit onderzoek geanalyseerd wordt, waarbij suboptimaal weggebruik een duidelijke invloed heeft op de doorstroming, heeft betrekking op de problemen met invoegende voertuigen. Uit onderzoek (Rijkswaterstaat, 2006) is gebleken dat veel files ontstaan bij de toerit naar het hoofdwegenet. Doordat voertuigen die willen invoegen weinig ruimte hebben (of krijgen) kunnen zij lastig invoegen. Ze worden gedwongen om hun snelheid te verminderen, het platoon te laten passeren en vervolgens met een lage snelheid in te voegen. Hierdoor moet het achteropkomende verkeer op de hoofdrijbaan afremmen en ontstaat een verstoring van de doorstroming.

Voor dit scenario wordt continu in de gaten gehouden of er op de rechterrijstrook sprake is van een platoon waardoor bij een toerit voertuigen geen ruimte krijgen om in te voegen. Om het

platoon beter over de weg te verdelen, kan zowel gekeken worden naar longitudinale als laterale oplossingen. Aangezien rijstrookwisselingen afhankelijk zijn van vele factoren en parameters, en daarmee een complex proces is, is in dit onderzoek alleen gekeken naar longitudinale oplossingen.

Longitudinale oplossingen om het platoon beter te spreiden zijn het versnellen van het voorste voertuig en het vertragen van de overige voertuigen in het platoon. Aangezien een versnelling van het voorste voertuig vaak niet wenselijk is, omdat het voorste voertuig al met zijn wensnelheid rijdt en omdat daarmee de snelheidsverschillen alleen maar groter worden, is gekozen om de overige voertuigen van het platoon te laten vertragen. Om te voorkomen dat achteropkomend verkeer hiervan hinder ondervindt, dienen de voertuigen alleen te vertragen als er voldoende ruimte achter het platoon aanwezig is.

Wanneer deze ruimte aanwezig is, krijgt een voertuig in het platoon de aanwijzing om de volgafstand met zijn voorligger te vergroten. Dit voertuig ondervindt een klein nadeel omdat deze licht moet afremmen, maar dankzij het gecreëerde hiaat in het platoon ondervinden voertuigen minder problemen tijdens het invoegen. Dit levert een hogere invoegsnelheid op en minder verstoring voor het achteropkomende verkeer op de hoofdrijbaan. In figuur 13 is het proces van het beter spreiden van het platoon schematische weergegeven.

Ook in deze situatie is het niet wenselijk dat de nieuwe wensvolgafstand continu gehandhaafd blijft. Daarom wordt de tweede aanwijzing gegeven om het oorspronkelijke weggedrag te herstellen als het platoon de toerit gepasseerd is of als het voertuig met de grotere wensvolgafstand niet meer op de rechterrijstrook rijdt.

Voor beide toepassingen van MDVM geldt dat per voertuig maximaal twee aanwijzingen gegeven worden; één op het moment dat het suboptimaal weggebruik geconstateerd is en één om het oorspronkelijke weggedrag te herstellen. In de volgende paragraaf wordt beschreven op welke wijze continu gecontroleerd wordt of één van deze verkeerssituaties optreedt en hoe vervolgens de individuele aanwijzingen gegeven worden.

### 5.3 Modelleren van MDVM in Fosim

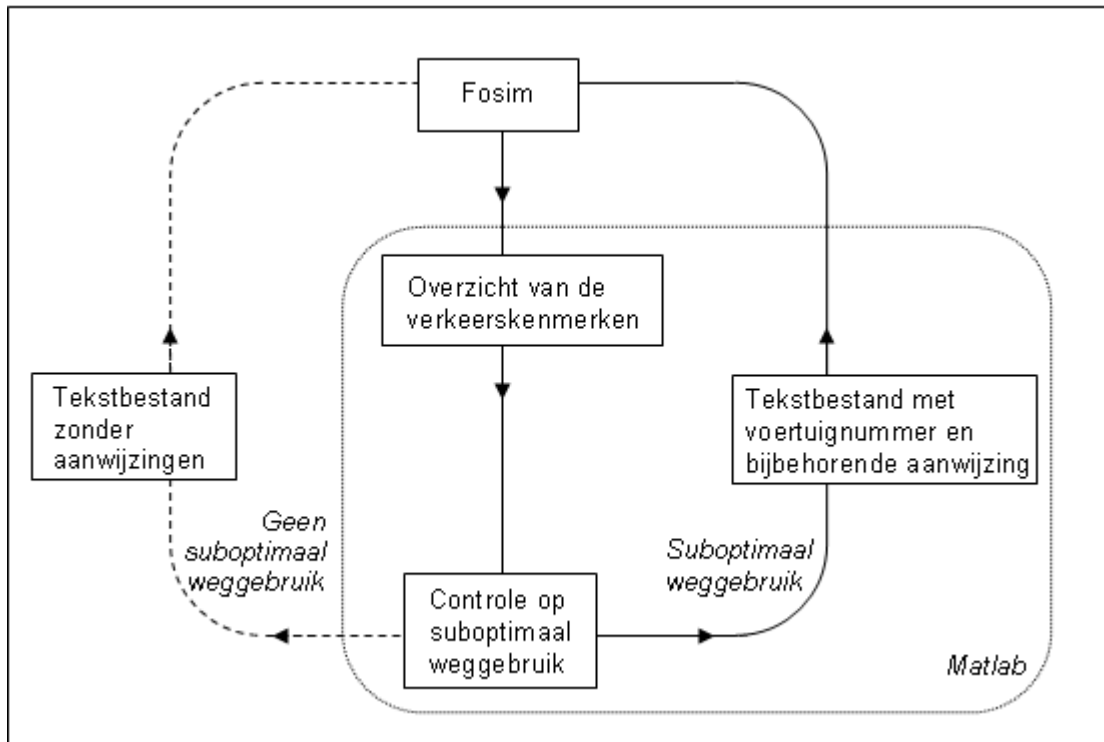
Om elke simulatiestap te controleren of er sprake is van suboptimaal weggebruik, is een overzicht nodig van de voertuigen met hun actuele positie, snelheid en acceleratie. Omdat Fosim deze uitvoer niet automatisch genereert, is een kleine aanpassing verricht aan de software waardoor Fosim na elke simulatiestap een overzicht van de voertuigen en hun verkeerskenmerken wegschrijft. De posities en de bijbehorende verkeerskenmerken worden vervolgens gecontroleerd op de in de vorige paragraaf beschreven voorwaarden van suboptimaal weggebruik.

Als er sprake is van suboptimaal weggebruik moet aan één of meerdere voertuigen een individuele aanwijzing gegeven worden. De bepaling van de aanwijzing is, net als het inlezen van de voertuigparameters en het controleren op de voorwaarden, geautomatiseerd in Matlab. Matlab bepaalt op basis van de voorwaarden uit de vorige paragraaf welke voertuigen een aanwijzing moeten krijgen en schrijft dit vervolgens weg in een tekstbestand. Doordat het in Fosim niet mogelijk is om voertuigparameters aan te passen, is wederom een kleine aanpassing aan de software gedaan zodat de waarden van het tekstbestand meegenomen worden in de volgende tijdstap van de simulatie. Daarbij is in dit onderzoek gekozen om elke aanwijzing direct op te nemen in Fosim. Hierdoor wordt uiteindelijk bepaald wat het maximale resultaat is van het geven van individuele aanwijzingen.



Figuur 13: Oorzaak en gevolg van een aanwijzing om het platoon beter te spreiden over de weg.

Wanneer er niet aan de voorwaarden voldaan wordt, en er dus geen sprake is van suboptimaal weggebruik, wordt niet ingegrepen in de verkeersstroom. Het tekstbestand dat weggeschreven wordt bevat geen aanwijzingen en Fosim genereert vervolgens de volgende tijdstap. In de onderstaande figuur is dit proces schematisch weergegeven.



Figuur 14: Softwareconfiguratie voor MDVM.

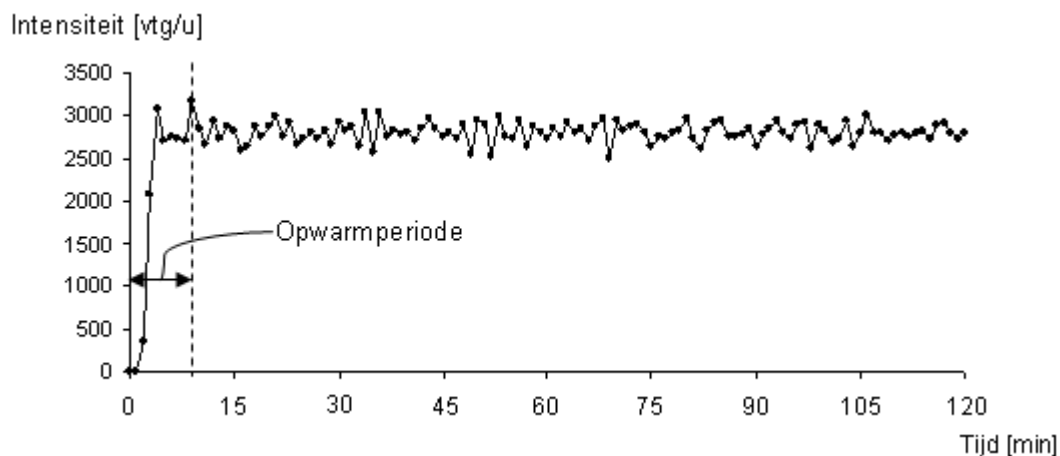
Op deze wijze wordt elke tijdstap gecontroleerd of er sprake is van suboptimaal weggebruik en wordt waar nodig ingegrepen door middel van een aanwijzing. In het volgende hoofdstuk wordt de exacte invulling van de simulaties van MDVM, zoals het wegontwerp, het intensiteitsverloop en de beoordelingscriteria beschreven.

## Hoofdstuk 6: Opzet simulatie MDVM

In het vorige hoofdstuk is beschreven welke vormen van suboptimaal weggebruik in dit onderzoek geanalyseerd worden en op welke manier dit plaatsvindt. Voordat MDVM daadwerkelijk gesimuleerd kan worden, moet in Fosim eerst een aantal keuzes gedaan worden over bijvoorbeeld het wegontwerp, het intensiteitsverloop, de verkeerssamenstelling en het aantal simulatieruns per scenario. De volgende paragraaf bevat een beschrijving van deze aannamen. Vervolgens worden de parameters gedefinieerd voor de twee eerder beschreven vormen van suboptimaal weggebruik. Daarbij worden ook de parameters voor de gevoeligheidsanalyse vastgesteld, zodat inzicht verkregen wordt in hoeverre de parameters effect hebben op de resultaten. Dit hoofdstuk eindigt met de keuze en de uitwerking van de beoordelingscriteria. Op basis van deze criteria wordt in het volgende hoofdstuk bepaald wat de effecten van MDVM zijn.

### 6.1 Invoergegevens

Voordat micro dynamisch verkeersmanagement daadwerkelijk gesimuleerd kan worden, dient een aantal keuzes gemaakt te worden die van belang zijn voor de opzet en uitkomst van de simulatie. In eerste instantie moet bepaald worden vanaf welk moment aanwijzingen gegeven zullen worden. Aangezien Fosim altijd met een leeg wegvak begint, wijkt in de opwarmperiode de intensiteit sterk af van de opgegeven intensiteit. Hierdoor ontstaat een onrealistisch verkeersbeeld dat buiten beschouwing gelaten wordt. Uit een aantal simulaties met een constante intensiteit van 2800 voertuigen per uur blijkt er sprake te zijn van een opwarmperiode van 9 minuten (zie figuur 15). Daardoor wordt bij de simulatie van MDVM gedurende de eerste 9 minuten geen controle op suboptimaal weggebruik uitgevoerd.



Figuur 15: Intensiteitsverloop en de opwarmperiode.

Daarnaast moet een keuze gemaakt worden ten aanzien van het aantal simulatieruns dat uitgevoerd wordt. De keuze voor het aantal runs is een afweging tussen de totale benodigde rekentijd en de betrouwbaarheid van de uitkomsten. Aan de hand van de onderstaande formule is bepaald hoeveel simulatieruns noodzakelijk zijn (Van Soest, 1997).

$$n > \frac{Z^2}{d^2} \sigma^2$$

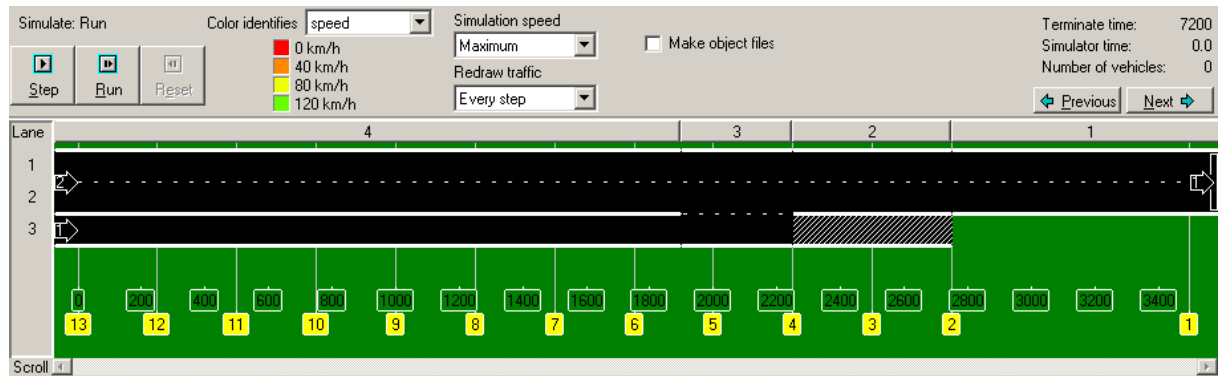
$n$  = minimaal benodigd aantal runs  
 $Z$  = betrouwbaarheid van de uitkomst  
 $d$  = gewenste nauwkeurigheid [km/u]  
 $\sigma$  = standaardafwijking [km/u]

In dit onderzoek is gekozen voor de algemeen aanvaarde betrouwbaarheid van 95 procent, wat overeenkomt met een Z-waarde van 1,96 (Norusis, 2000). De gewenste nauwkeurigheid en standaardafwijking zijn gebaseerd op de uitkomsten van een aantal testruns. Omdat de standaardafwijking over de hele simulatieperiode erg groot is, als gevolg van de verschillende verkeerstoestanden, en omdat MDVM alleen ingrijpt bij hoge intensiteiten, is voor de bepaling van het aantal runs gebruik gemaakt van de gemiddelde snelheid en de standaardafwijking tijdens de file. De gewenste nauwkeurigheid is vastgesteld op vijf procent van de gemiddelde snelheid, oftewel 1,8 km/u, en de standaardafwijking is 3,8 km/u. Het aantal simulatieruns in dit onderzoek komt daardoor op 17 runs per scenario. Ter controle is ook het minimaal benodigde aantal runs bepaald op basis van de intensiteit en de reistijd tijdens congestie en daaruit bleek dat 17 runs per scenario voldoende betrouwbaar is (zie bijlage 3).

Naast de bovenstaande keuzes dient ook een aantal aannamen gedaan te worden met betrekking tot het wegontwerp en de verkeerssamenstelling. Zoals in het eerste hoofdstuk beschreven is, wordt MDVM alleen toegepast op het hoofdwegennet. Hierdoor is gekozen voor een tweestrooks autosnelweg met een totale lengte van 3,5 kilometer, bestaande uit het gedeelte waar de analyse plaatsvindt en de opwarmenlengte. De lengte waar de analyse van MDVM plaatsvindt, is een compromis tussen enerzijds de benodigde afstand om een totaalbeeld van de congestie te krijgen, inclusief het verkeersverloop voor en na de bottleneck, en anderzijds een lang wegvak waarbij overbodige informatie ingewonnen wordt en de simulatietijd onnodig toeneemt. De opwarmenlengte is het eerste gedeelte van het wegvak waar nog een ongelijkmatig verkeersbeeld ontstaat als gevolg van de onjuiste verdeling van het verkeer over de rijstroken.

Om congestie te simuleren is een enkelstrooks toerit toegevoegd (zie figuur 16). De toerit heeft een lengte van ruim twee kilometer, zodat voldoende ruimte is om voertuigen te kunnen blijven genereren als er een wachtrij ontstaat. Een belangrijke factor voor het invoeggedrag is de lengte van het invoeggedeelte. Wanneer voertuigen over een grote lengte de mogelijkheid hebben om in te voegen, zullen zij beter in staat zijn hun snelheid aan te passen aan het verkeer op de hoofdrijbaan en zal een acceptabel hiaat gezocht worden. Een kort invoeggedeelte zorgt er voor dat voertuigen met een lage snelheid invoegen en dat sneller een hiaat gecreëerd en geaccepteerd moet worden, waardoor dit de doorstroming op de hoofdrijbaan niet ten goede komt. In de 'Nieuwe ontwerprichtlijn autosnelwegen' (Rijkswaterstaat-AVV, 2007) wordt standaard een afstand van 250 meter voor het invoeggedeelte en 100 meter voor het wigvormiggedeelte aanbevolen. Aangezien in Fosim geen wigvormiggedeelte kan worden toegevoegd, is gekozen voor een invoeggedeelte van 350 meter. De boogstraal en hellingshoek van de toerit zorgen er vaak voor dat de snelheid op de toerit lager ligt dan de snelheid op de hoofdrijbaan. Hierdoor is in Fosim een snelheidsdrukking van tachtig procent op de toerit toegevoegd.

Het wegvak in Fosim is verder vormgegeven op basis van de standaarden zoals die gelden op het grootste deel van het Nederlandse hoofdwegennet. Hierdoor bedraagt de maximumsnelheid 120 km/u voor personenauto's en 80 km/u voor vrachtwagens en is er geen sprake van een inhaalverbod voor vrachtwagens. Tot slot wordt er voor de hoofdrijbaan vanuit gegaan dat de hellingshoek en horizontale bochten dusdanig klein zijn dat ze geen effect hebben op het rijgedrag.



Figuur 16: Overzicht wegontwerp in Fosim.

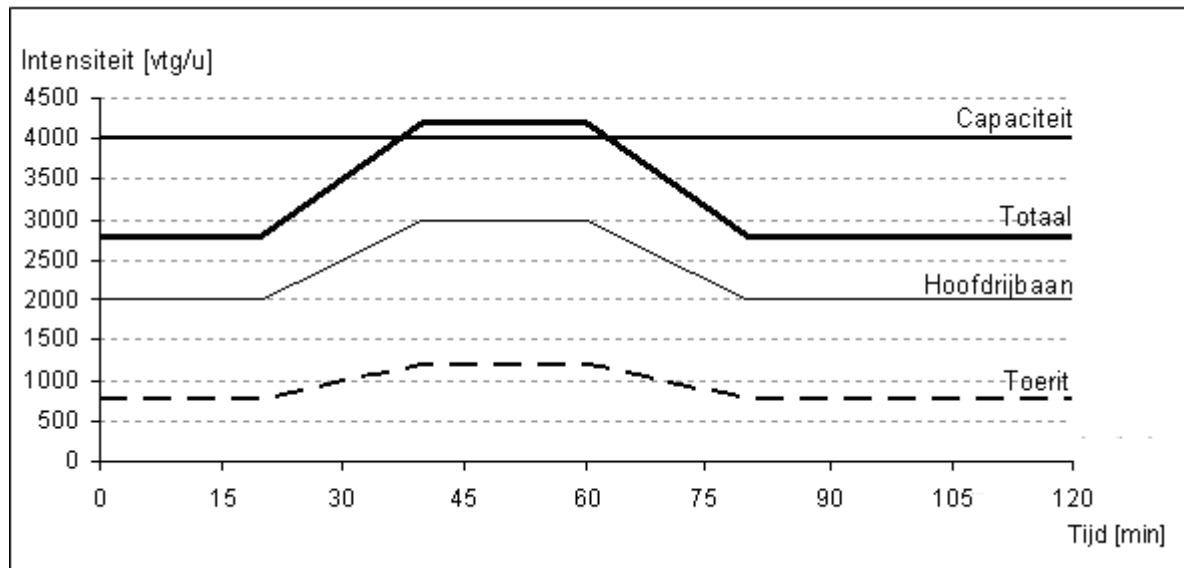
Zoals in de bovenstaande figuur te zien is bevat het wegontwerp ook 13 detectoren voor de verzameling van de data. Er is voor gekozen om elke 250 meter een detector te plaatsen zodat enerzijds voldoende gegevens beschikbaar zijn en anderzijds de reken- en simulatietijd niet te veel toeneemt. In de laatste kilometer zijn minder detectoren geplaatst, omdat daar geen congestie ontstaat en het daardoor minder interessant is voor de analyse van MDVM.

Het wegontwerp bevat twee herkomsten, één aan het begin van de hoofdrijbaan en één aan het begin van de toerit, en er is één bestemming. De herkomsten genereren het verkeer op basis van een vooraf ingestelde intensiteit. Voor de simulatie van MDVM is het van belang dat er voldoende verkeer gegenereerd wordt en dat er uiteindelijk congestie ontstaat. Suboptimaal weggebruik heeft vooral grote invloed op de doorstroming op het moment dat de capaciteit bijna bereikt wordt. Daarom begint de simulatie met 2000 voertuigen per uur op de hoofdrijbaan en 800 voertuigen per uur op de toerit. Op dit moment is er nog sprake van een vrije afwikkeling van het verkeer. Vervolgens wordt de intensiteit op zowel de hoofdrijbaan als de toerit verhoogd tot respectievelijk 3000 en 1200 voertuigen per uur. Aangezien de capaciteit voor twee rijstroken op ongeveer 4000 voertuigen per uur ligt, zal na verloop van tijd congestie ontstaan doordat de intensiteit groter is dan de capaciteit. Nadat de intensiteit enige tijd boven de capaciteit ligt, waardoor de file blijft groeien, wordt na verloop van tijd de intensiteit weer verlaagd tot 2000 en 800 voertuigen per uur zodat aan het eind van de simulatie de file weggewerkt is.

Het intensiteitsverloop is zodanig gekozen dat file pas op een laat moment ontstaat als gevolg van het te grote verkeersaanbod. De file die voor dit moment ontstaat, is altijd het gevolg van suboptimaal weggebruik, waardoor de effecten van MDVM goed gesimuleerd wordt.

Het exacte intensiteitsverloop is tevens afhankelijk van de simulatieduur. Een korte simulatieduur leidt er toe dat niet alle verkeerstoestanden bereikt worden, terwijl een lange simulatieduur logischerwijs veel tijd in beslag neemt en bovendien voor veel onnodige data zorgt. Voor de simulatie van MDVM is uiteindelijk gekozen voor een simulatieduur van twee uur. Dit zorgt voor het intensiteitsverloop en de capaciteit zoals in figuur 17 is weergegeven.





Figuur 17: Intensiteitsverloop gedurende de simulatie.

Ten aanzien van de intensiteit is van belang om onderscheid te maken tussen de verschillende voertuigtypen. De verdeling tussen het vracht- en personenverkeer is gebaseerd op het gemiddelde percentage vrachtverkeer op de Nederlandse snelwegen. Onderzoek van Rijkswaterstaat (2009) heeft aangetoond dat overdag gemiddeld 12 procent van het verkeer uit vrachtwagens bestaat.

De bestuurders van vrachtwagens en van personenauto's hebben verschillende rijstijlen waardoor niet elke vrachtwagen of personenauto zich hetzelfde gedraagt of reageert. Hierdoor is in Fosim onderscheid gemaakt in twee en drie verschillende voertuig-bestuurdercombinaties voor respectievelijk vrachtwagens en personenauto's (zie bijlage 2). Elke voertuig-bestuurdercombinatie heeft daarbij een verschillende waarde voor onder andere de wenssnelheid, volgafstand en maximale acceleratie. Aangezien Fosim met deze standaardinstellingen gekalibreerd is, en het voor de simulatie van MDVM geen toegevoegde waarde heeft om deze instellingen te wijzigen, wordt niet afgeweken van de standaardinstellingen zoals in bijlage 2 is weergegeven (Dijker en Knoppers, 2006). Het percentage per voertuigtype is daardoor als volgt verdeeld:

- Personenauto's (88%)
  - { Voertuigtype A: 29,3%
  - { Voertuigtype B: 29,3%
  - { Voertuigtype C: 29,3%
- Vrachtwagens (12%)
  - { Voertuigtype D: 6%
  - { Voertuigtype E: 6%

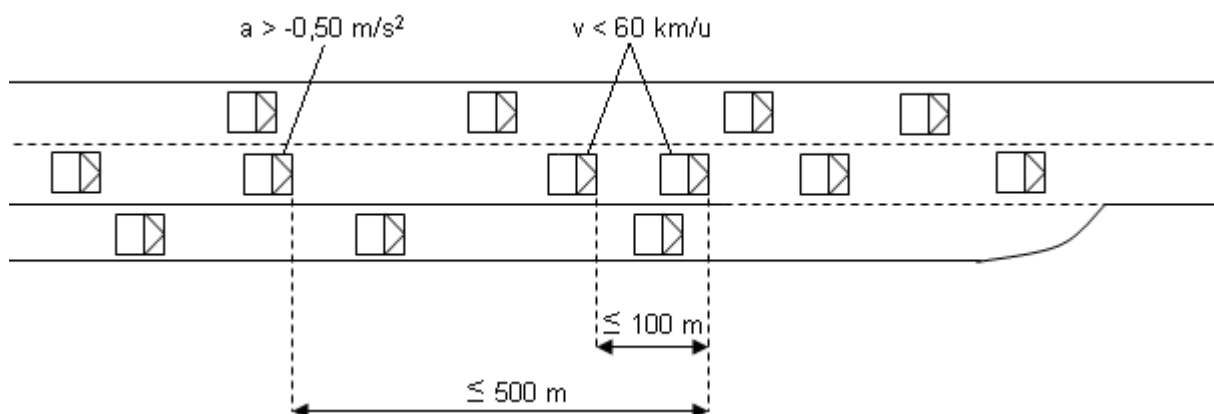
## 6.2 Parameterinstellingen van de scenario's

Op basis van de invoergegevens uit de vorige paragraaf kan de referentiesituatie gesimuleerd worden. Voor de twee verkeerssituaties met suboptimaal weggebruik is het echter noodzakelijk om de parameters die in Matlab opgenomen zijn te specificeren. Daarnaast wordt in deze paragraaf bepaald op welk moment een voertuig het bericht krijgt om de aanwijzing niet langer uit te voeren en terug te gaan naar het oorspronkelijke weggedrag. Daarbij geldt voor beide scenario's dat voertuigen maximaal twee aanwijzingen krijgen, namelijk een aanwijzing met het gewenste weggedrag en een aanwijzing om het oorspronkelijke weggedrag te herstellen.

### Anticipatie op langzame voorliggers

Zoals in paragraaf 5.2 beschreven is, wordt in dit scenario gekeken of er sprake is van voertuigen die langzamer rijdende voertuigen met groot snelheidsverschil naderen. Aangezien het voor kan komen dat één voertuig gedurende korte tijd met een lagere snelheid rijdt, zonder dat dit grote invloed heeft op het achteropkomende verkeer, is er voor gekozen dat aanwijzingen pas gegeven worden bij twee voertuigen die langzaam rijden. Deze twee voertuigen dienen op dezelfde rijstrook en binnen 100 meter van elkaar te rijden met een snelheid lager dan 60 km/u. Snelheden boven de 60 km/u komen regelmatig voor waardoor het aantal aanwijzingen sterk toeneemt. Daarnaast is het effect minimaal omdat de snelheidsverschillen kleiner zijn en daardoor de geadviseerde snelheid niet veel afwijkt van de huidige snelheid. Wanneer aanwijzingen pas gegeven worden bij veel lagere snelheden, bijvoorbeeld bij 30 km/u, duurt het erg lang voordat een aanwijzing gegeven wordt. Achteropkomend verkeer krijgt pas een aanwijzing wanneer een voertuig praktisch stil staat. Daardoor is het snelheidsverschil dusdanig groot dat een voertuig al eerder geneigd is om te remmen en de aanwijzing dus weinig effect heeft.

Het is niet wenselijk om alle voertuigen stroomopwaarts van een langzamer voertuig een aanwijzing te geven. Voertuigen die op ruime afstand van het langzamere voertuig rijden ondervinden geen hinder van dat voertuig. Om een voertuig dat met 120 km/u rijdt op tijd een aanwijzing te geven, zodat deze op gelijkmatige wijze kan vertragen, is een minimale afstand van 400 meter nodig<sup>4</sup>. Uiteindelijk is er voor gekozen om tot maximaal 500 meter voor een voertuig te kijken of er sprake is van een voertuig dat langzamer dan 60 km/u rijdt. Voor voertuigen die dicht achter het langzame voertuig rijden, geldt dat zij al aan het vertragen zijn. Het is daarom overbodig om voertuigen een aanwijzing te geven als hun versnelling kleiner of gelijk is aan  $-0,50 \text{ m/s}^2$ . De onderstaande figuur toont een schematische weergave van de parameters voor het geven van aanwijzingen aan voertuigen die voorliggers snel naderen.



Figuur 18: Schematische weergave van de parameters voor het eerder anticiperen op langzame voertuigen.

Zodra aan deze voorwaarden voldaan wordt, krijgt een voertuig de aanwijzing om zijn snelheid aan te passen aan die van de tragere voorliggers. Deze verlaging van de snelheid blijft natuurlijk niet continu noodzakelijk. Daarom wordt voortdurend gecontroleerd of de snelheid van de voertuigen die een aanwijzing gehad hebben terug kan naar de oorspronkelijke waarde. Dit is het geval als de snelheid van de voertuigen tot 500 meter stroomafwaarts boven de 60 km/u ligt. Daarnaast moet de snelheid hersteld worden als het voertuig een grotere vertraging heeft dan  $-0,50 \text{ m/s}^2$  of als het met constante snelheid rijdt omdat het aan het volgen is.

Om te bepalen welke invloed de afstand waarover vooruit gekeken wordt en de snelheid van het langzame voertuig hebben op de uitkomsten, wordt ook een aantal simulaties uitgevoerd waarbij

<sup>4</sup> Bij een snelheidsverschil van 60 km/u en een vertraging van  $-0,50 \text{ m/s}^2$  duurt het ongeveer 35 seconden voordat de gewenste volgafstand bereikt is. Het achteropkomende voertuig legt ongeveer 850 meter af en het tragere voertuig 450 meter af, op basis waarvan de afstand van ongeveer 400 meter berekend is.

de waarde van deze parameters gewijzigd wordt. In de eerste plaats wordt bepaald welke invloed de afstand van 500 meter heeft bij het vooruitkijken of er stroomafwaarts sprake is van een langzaam voertuig. Deze waarde wordt gewijzigd van 500 meter naar zowel 400 als 600 meter. Daarnaast wordt bepaald welke invloed de keuze voor 60 km/u heeft bij de bepaling van langzamere voertuigen door ook MDVM te simuleren met 40 en 50 km/u.

### **Invoegen met lage snelheid als gevolg van een platoon**

In het tweede scenario worden aanwijzingen gegeven als platoons het invoegende verkeer dreigen te belemmeren. Daarvoor wordt gezocht naar de situatie waarbij vier voertuigen binnen een afstand van 150 meter op de rechterrijstrook rijden. Daarbij dient het voorste voertuig een lagere snelheid te hebben dan de wenssnelheid van andere voertuigen, omdat anders het platoon vanzelf oplost. Tevens is het niet zinvol om bij alle platoons op het wegvak in te grijpen. Om de onrust in de verkeersstroom tijdens het invoegen te beperken, is er voor gekozen om geen aanwijzingen te geven aan platoons die zich ter hoogte van het invoeggebied bevinden.

Daarnaast is het ook niet wenselijk om erg ver voor de toerit al in te grijpen in het platoon, omdat de verkeerssituatie in de tussentijd nog wijzigt en het platoon van lengte of samenstelling kan veranderen of zelfs op kan lossen. In de gunstigste situatie duurt het ruim 14 seconden om een hiaat van minimaal vijftig meter te creëren<sup>5</sup>, waardoor bij een snelheid van ongeveer 100 km/u een minimale afstand nodig is van 400 meter. Aangezien sommige voertuigen dichter achter elkaar rijden is meer dan 400 meter nodig om het hiaat te creëren. Tevens dient het gehele platoon waargenomen te worden, waardoor uiteindelijk gekozen is om over een afstand van 900 meter te monitoren of er sprake is van een platoon. Het hiaat is nodig ter hoogte van de toerit, op 1900 meter van het wegvak, waardoor alleen naar platoons gezocht wordt tussen 1000 en 1900 meter op het wegvak.

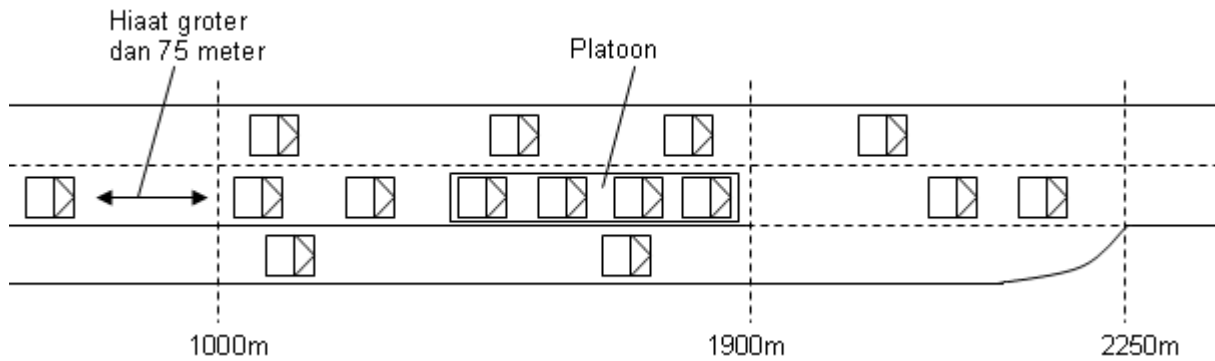
Voor het geven van een aanwijzing is de aanwezigheid van een platoon echter niet voldoende. Er is achter het platoon ook een hiaat nodig dat gebruikt kan worden om ruimte in het platoon te creëren en waardoor het achteropkomende verkeer geen hinder ondervindt. Aangezien een gemiddelde volgafstand ongeveer 50 meter bedraagt, is een hiaat van minimaal 75 meter noodzakelijk binnen vier voertuigen achter het laatste voertuig van het platoon. Met dit hiaat kan ongeveer 25 meter extra volgafstand gecreëerd worden in het platoon.

Tot slot is het in dit scenario van belang dat, op het moment dat het platoon het invoeggebied bereikt, er ook een voertuig is dat in wil voegen. Daarvoor wordt doorgerekend hoelang het platoon er over doet om het invoeggebied te bereiken. Als in de zelfde tijd een voertuig op de toerit het invoeggebied bereikt wordt aan alle voorwaarden voldaan en is het de verwachting dat suboptimaal weggebruik op zal treden.

In de figuur 19 is een verkeerssituatie geschetst waarbij aan de bovenstaande voorwaarden voldaan wordt en er dus een aanwijzing gegeven moet worden. Ten eerste is er sprake van een platoon op de rechterrijstrook die zich tussen de 1000 en 1900 meter bevindt. Daarnaast is er een hiaat van 75 meter binnen 4 voertuigen achter het platoon aanwezig. Vervolgens is voor zowel het platoon als de voertuigen op de toerit berekend hoelang het duurt voordat zij het invoeggebied bereiken. Daaruit blijkt dat het voorste voertuig op de oprit en het platoon gelijktijdig het invoeggebied bereiken en er dus een ongewenste situatie zal ontstaan.

<sup>5</sup> Met een eenparige vertraging duurt het ruim 14 seconden voordat een hiaat van vijftig meter gecreëerd is:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot x}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{0,50}} = 14,1 \text{ sec}$$



Figuur 19: Voorbeeld van een verkeerssituatie waar een invoegend voertuig gehinderd zal worden door het platoon.

De aanwijzing die vervolgens gegeven wordt, moet de volgfstand in het platoon vergroten waardoor het voor een invoegend voertuig makkelijker wordt om in te voegen. Daarbij is het niet nodig om alle volgfstanden in het platoon te vergroten, want dit leidt alleen maar tot capaciteitsverlies, maar is er voor gekozen om de aanwijzing alleen aan het tweede voertuig in het platoon te geven. De vergroting van de volgfstand wordt gecreëerd door de  $z_2$ -waarde (zie paragraaf 5.1) te verhogen. Voor de simulatie van MDVM is een toename van het hiaat tot ongeveer veertig meter nodig, zodat voldoende ruimte ontstaat voor invoegende voertuigen. Bij een snelheid van ongeveer 85 km/u komt een volgfstand van ongeveer veertig meter overeen met een  $z_2$ -waarde van 1,5 ongeacht het type voertuig dat het hiaat creëert. Doordat de standaard  $z_2$ -waarde voor het vrachtverkeer (type 4 en 5) echter respectievelijk 2,08 en 2,23 is, leidt een aanpassing tot 1,5 er toe dat de volgfstand juist verkleind wordt. Hierdoor is er voor gekozen om tijdens de simulaties de  $z_2$ -waarde van het vrachtverkeer niet te wijzigen.

De aanpassing van de  $z_2$ -waarde naar 1,5 zorgt er vervolgens voor dat het betreffende voertuig passief gaat remmen totdat de nieuwe wensvolgfstand bereikt is. Uiteraard is het gebruik van deze nieuwe wensvolgfstand na verloop van tijd niet meer nodig. Daarom zal de  $z_2$ -waarde teruggezet worden als het voertuig voorbij de toerit is, als het een snelheid heeft van minder dan 60 km/u of als het niet meer op de rechterraaijstrook rijdt.

Ook voor deze situatie van suboptimaal weggebruik wordt onderzocht wat de invloed is van een aantal specifieke parameters. Aangezien dit scenario meerdere parameters kent die van invloed kunnen zijn op het eindresultaat, wordt een zestal extra simulaties uitgevoerd. Ten eerste wordt de invloed bepaald van de afstand tussen de vier voertuigen die het platoon vormen. Leidt het geven van aanwijzingen aan platoons waarbij de voertuigen dichter op elkaar rijden, namelijk vier voertuigen binnen een afstand van minder dan 100 meter, tot minder aanwijzingen en daarmee tot een verbetering van de effectiviteit? Of leidt een toename van de afstand waarbinnen de vier voertuigen zich moeten bevinden tot 180 meter er toe dat het aantal aanwijzingen toeneemt en daarmee ook het effect? Met betrekking tot de locatie van de platoons wordt bepaald of ook het geven van aanwijzingen aan platoons die zich in het invoeggebied bevinden een positieve impact heeft op de doorstroming of zorgt dit juist voor een extra verstoring van de verkeersstroom en daarmee een slechtere doorstroming? Een andere parameter die nader onderzocht wordt, is de bepaling van de grootte van het hiaat. Zorgt een groter hiaat, dankzij een  $z_2$ -waarde van 1,8, er voor dat voertuigen makkelijker in kunnen voegen en daarmee een verbetering van de doorstroming optreedt? Tot slot wordt de invloed van de benodigde ruimte achter het platoon bepaald. Leidt een vergroting van het benodigde hiaat achter het platoon tot 100 meter er toe dat de gevolgen voor het achteropkomende verkeer afnemen en daarmee het effect toeneemt? Of is het juist belangrijker dat het hiaat zich dicht achter het platoon bevindt, namelijk binnen drie in plaats van vier voertuigen? Om het verschil te kunnen bepalen tussen deze varianten is voor de simulatie van MDVM een aantal criteria geformuleerd die de effectiviteit beoordelen.

### 6.3 Beoordelingscriteria

Zoals in paragraaf 4.2 beschreven is, is het de verwachting dat MDVM bijdraagt aan een verbeterde verkeersafwikkeling, gelijkmatigere verkeersstroom en daardoor een positieve bijdrage heeft voor de verkeersveiligheid en het milieu. Om tot een gedegen conclusie te komen over het effect van MDVM zijn verschillende criteria nodig waarop beoordeeld wordt. Daarbij is het van belang dat zowel kwalitatieve als kwantitatieve uitspraken gedaan worden op micro- en macroniveau. Daarnaast dienen niet alleen conclusies getrokken te worden omtrent de verkeersdoorstroming, maar moet ook het effect op andere mobiliteitsproblemen, zoals de verkeersveiligheid en het milieu, vastgesteld worden. In dit onderzoek is uiteindelijk voor drie beoordelingscriteria gekozen, namelijk de doorstroming, de totale verliestijd en de verkeersveiligheid die uitgedrukt wordt in de stabiliteit.

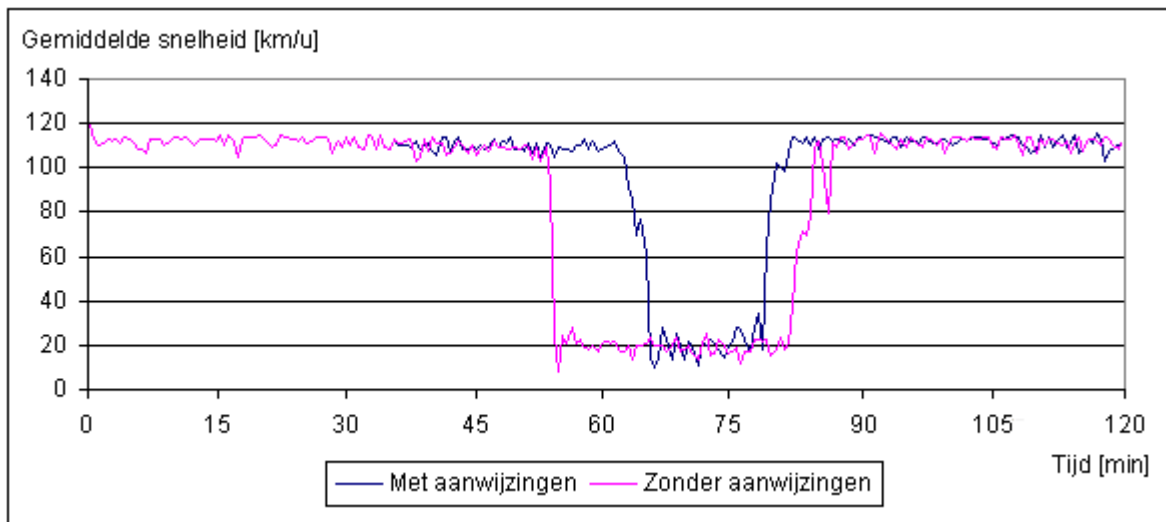
#### Doorstroming

Voor de bepaling van de doorstroming ligt het voor de hand om te kijken naar het aantal passerende voertuigen op een vaste locatie gedurende de totale simulatieduur. Dit overzicht heeft echter een belangrijk nadeel op het moment dat de intensiteit daalt. Er valt namelijk niet af te leiden of de daling veroorzaakt wordt door file of doordat de verkeersvraag afgenomen is. Daarom is gekozen om de doorstroming te bepalen aan de hand van het verloop van de gemiddelde snelheid. Wat is de gemiddelde snelheid onder vrije omstandigheden en hoe verhoudt deze zich tot de snelheid tijdens de file? Wat is het moment dat de file optreedt en hoe lang duurt het voordat de gemiddelde snelheid weer toeneemt?

Om deze vragen beantwoord te krijgen is elke dertig seconden bepaald wat de gemiddelde snelheid is van de voertuigen die gepasseerd zijn. Deze data is door elke detector verzameld, maar voor de analyse is gekozen alleen gebruik te maken van de eerste detector stroomopwaarts van het invoeggebied, namelijk detector 6. Op dit meetpunt wordt als eerste het ontstaan van de file waargenomen en als laatste het eind van de file, waardoor het meest nauwkeurige beeld over het fileverloop ontstaat.

Wanneer de gemiddelde snelheden van één simulatierun, voor zowel met als zonder aanwijzingen, uitgezet wordt tegen de tijd ontstaat het snelheidsverloop zoals in figuur 20 is weergegeven. Op basis van deze figuur kan bepaald worden of de situatie beter, gelijk of slechter geworden is dankzij de gegeven aanwijzingen. Het is echter niet mogelijk om in zijn algemeenheid betrouwbare conclusies te trekken op basis van één simulatierun. Hiervoor is de data over de zeventien runs gemiddeld en ontstaat een figuur met het gemiddelde snelheidsverloop. Op basis van het gemiddelde snelheidsverloop wordt het verschil in het moment waarop de file ontstaat en de fileduur tussen de situatie met en zonder aanwijzingen bepaald.

Het voorbeeld in figuur 20 geeft aan dat de aanwijzingen een positief effect hebben voor deze run, aangezien de file zowel later begint als eerder ophoudt. De aanwijzingen hebben er dus voor gezorgd dat het verkeerspatroon veranderd is waardoor het verkeer langer met een hogere gemiddelde snelheid door kan rijden en de file eerder afgelopen is. Uit de figuur blijkt tevens dat de eerste 35 minuten geen aanwijzingen gegeven zijn, omdat het snelheidsverloop identiek is aan de simulatie zonder aanwijzingen.



Figuur 20: Voorbeeld van het snelheidsverloop voor detector 6 (1750 meter) voor één simulatierun.

### Totale verliestijd

Naast de kwalitatieve bepaling van de doorstroming wordt ook het effect van MDVM bepaald op basis van kwantitatieve gegevens, namelijk in de vorm van de totale verliestijd. Onder vrije omstandigheden bedraagt de gemiddelde reistijd, over alle voertuigtypen en rijstroken, 120 seconden over het hele wegvak. Elke seconde die een voertuig er langer over doet, als gevolg van file of andere vertragingen, wordt gezien als verliestijd. De verliestijd voor alle voertuigen in de simulatierun wordt uiteindelijk opgeteld waardoor de totale verliestijd ontstaat. De gemiddelde totale verliestijd is de totale verliestijd berekend over de 17 runs.

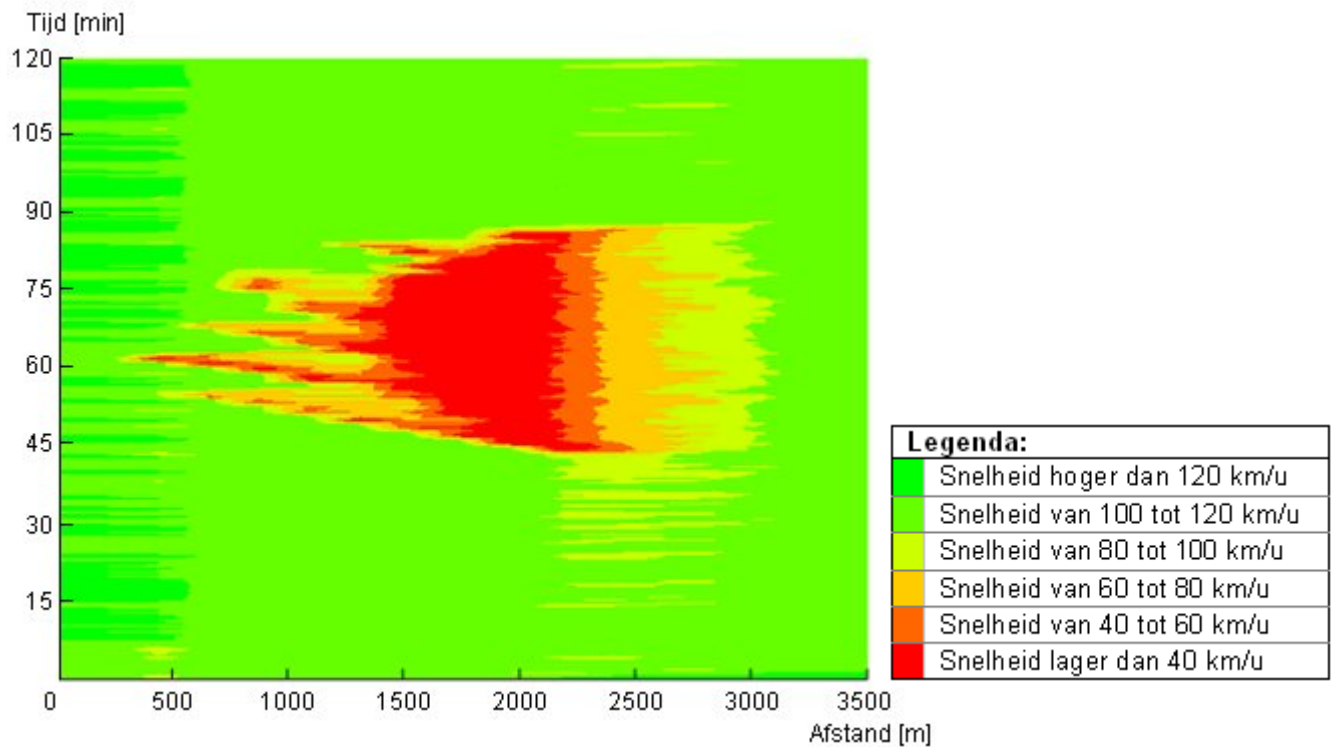
Aangezien de totale verliestijd per simulatierun sterk kan verschillen is het niet mogelijk om de significantie te bepalen door de gemiddelde totale verliestijd over de 17 runs met elkaar te vergelijken. De significantie wordt bepaald op basis van een paarsgewijze vergelijking van de totale verliestijd per simulatierun met en zonder de individuele aanwijzingen. Door deze paarsgewijze vergelijking wordt vastgesteld of de individuele aanwijzingen hebben geleid tot een significant verschil in de gemiddelde totale verliestijd. Eerst wordt de F-toets uitgevoerd om te controleren of de steekproefvarianties gelijk zijn. Vervolgens wordt door middel van de t-toets voor afhankelijke steekproeven bepaald of er sprake is van een significant verschil in de gemiddelde totale verliestijd.

<p><u>F-toets:</u></p> $F = \frac{s_x^2}{s_y^2} \qquad F_{\text{krit}} = 2,33$ <p><math>s_x^2</math> = steekproefvariantie met aanwijzingen  <math>s_y^2</math> = steekproefvariantie zonder aanwijzingen</p> <p><math>H_0</math>: variantie<sub>x</sub> = variantie<sub>y</sub>  <math>H_1</math>: variantie<sub>x</sub> ≠ variantie<sub>y</sub></p> <p><math>F &lt; F_{\text{krit}}</math>: <math>H_0</math> accepteren  <math>F &gt; F_{\text{krit}}</math>: <math>H_0</math> verwerpen  95% betrouwbaarheid</p>	<p><u>t-toets:</u></p> $t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{sed} \qquad t_{\text{krit}} = 2,120$ $sed = \frac{s_d}{\sqrt{n-1}}$ $s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n D_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n D_i)^2}{n}}{n}}$ <p><math>\bar{x}</math> = gem. totale verliestijd met aanwijzingen  <math>\bar{y}</math> = gem. totale verliestijd zonder aanwijzingen  sed = standaardfout van de verschillen  <math>s_d</math> = standaarddeviatie van verschillen tussen paren  n = aantal paren  D = verschil in totale verliestijd per paar</p> <p><math>H_0</math>: <math>\mu_x = \mu_y</math>  <math>H_1</math>: <math>\mu_x \neq \mu_y</math></p> <p><math>t &lt; t_{\text{krit}}</math>: <math>H_0</math> accepteren  <math>t &gt; t_{\text{krit}}</math>: <math>H_0</math> verwerpen  95% betrouwbaarheid</p>
---	---

### Stabiliteit

Naast een effect op de doorstroming is het de verwachting dat MDVM zorgt voor kleinere snelheidsverschillen en daarmee bijdraagt aan een gelijkmatigere en veiligere verkeersstroom. Om te bepalen of het geven van de aanwijzingen leidt tot een gelijkmatigere verkeersstroom, worden de snelheidscontourplots geanalyseerd. Een snelheidscontourplot geeft een overzicht van het snelheidsverloop over de tijd en de afstand (zie figuur 21). De waarden zijn bepaald door elke dertig seconden voor elke detector te meten wat de gemiddelde snelheid van de gepasseerde voertuigen is. Groen geeft daarbij aan dat er sprake is van vrije afwikkeling terwijl in de rode gebieden sprake is van file. De strepen stroomafwaarts van het filegebied geven daarnaast aan dat er schokgolven optreden. Zoals in paragraaf 3.1 uitgelegd is, worden schokgolven veroorzaakt door het onrustige optrekken en weer afremmen. Voor een stabielere en veiligere verkeersstroom is het dan ook met name van belang dat de schokgolven in aantal en in lengte verminderd moeten worden.

Voor elke simulatie run wordt aan de hand van de snelheidscontourplots bepaald hoeveel schokgolven er zijn en wat de lengte in afstand van elke schokgolf is. Uiteindelijk wordt het aantal en de gemiddelde lengte van de schokgolven voor de runs met aanwijzingen vergeleken met het aantal en de lengte van de schokgolven wanneer geen aanwijzingen gegeven worden, zodat bepaald kan worden of er sprake is van een gelijkmatigere verkeersstroom.



Figuur 21: Voorbeeld van een snelheidscontourplot voor een simulatierun zonder aanwijzingen.

Op basis van de bovenstaande invoergegevens en parameterinstellingen kunnen de simulaties opgebouwd en uitgevoerd worden. Met behulp van de beoordelingscriteria is het vervolgens mogelijk om het effect te bepalen. Het volgende hoofdstuk bevat de uitkomsten van de verschillende scenario's en beschrijft of er sprake is van een verbetering ten opzichte van de referentiestatie.

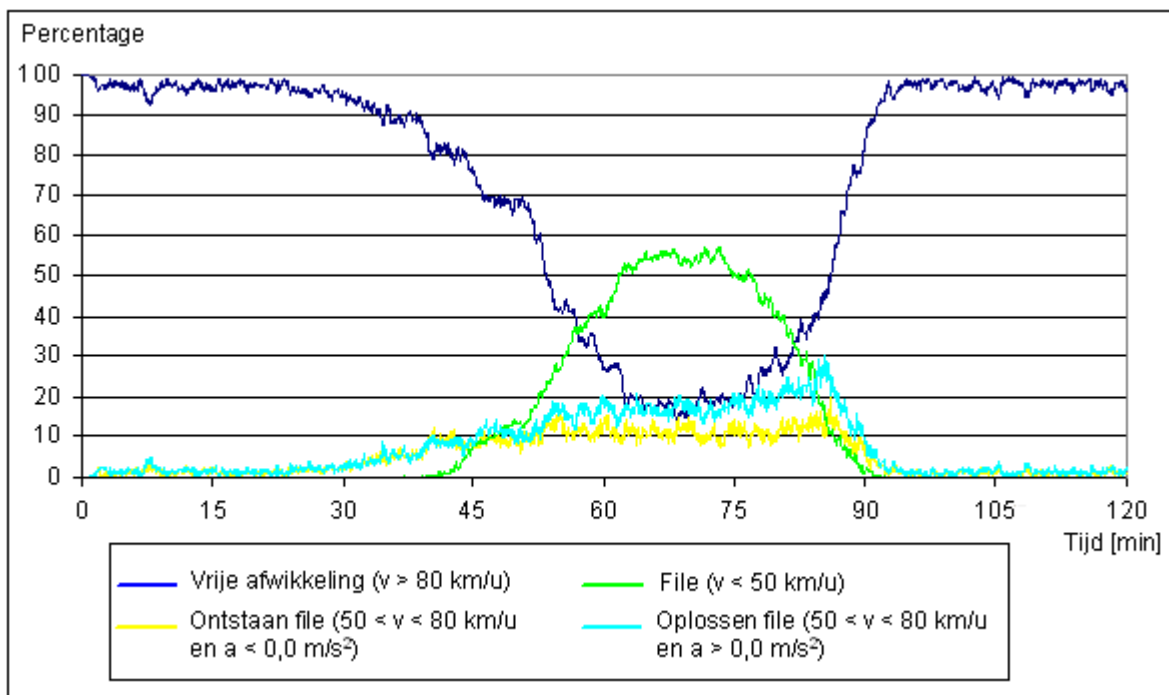


## Hoofdstuk 7: Resultaten simulatie MDVM

Op basis van de instellingen en voorwaarden van de voorgaande hoofdstukken zijn de verschillende verkeerssituaties gesimuleerd. De volgende drie paragrafen bevatten achtereenvolgens de belangrijkste resultaten van de referentiesituatie, de verkeerssituatie waarbij eerder geanticipeerd wordt op langzamere voorliggers en de situatie waarbij een invoegend voertuig gehinderd wordt door een platoon. De drie paragrafen bevatten een overzicht van de resultaten en de interpretatie van de beoordelingscriteria. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met de algemene conclusie over het effect van MDVM.

### 7.1 Referentiesituatie

De referentiesituatie geeft inzicht in de doorstroming, de totale verliestijd en de stabiliteit onder normale omstandigheden, dus zonder dat er individuele aanwijzingen gegeven worden. Met betrekking tot de doorstroming toont figuur 22 aan dat de referentiesituatie een gelijkmatig verloop van de verkeerstoestanden kent. Na de opwarmperiode is er sprake van een rustig en gelijkmatig verkeersbeeld, waarbij na verloop van tijd geleidelijk file ontstaat.



Figuur 22: Verloop van de verschillende verkeerstoestanden voor de referentiesituatie.

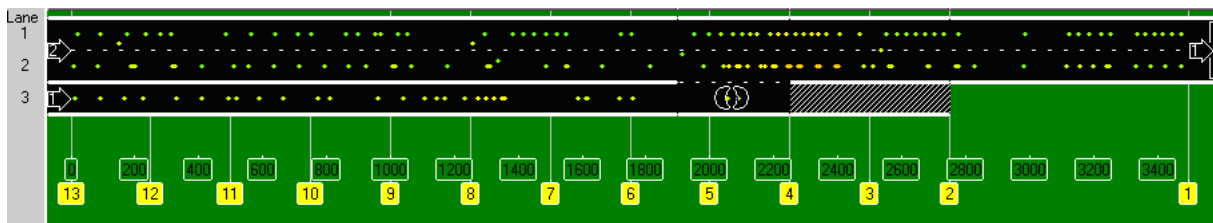
Zoals in paragraaf 6.1 beschreven is, is het voor de bepaling van het effect van MDVM van belang dat file ontstaat als gevolg van suboptimaal weggebruik en niet doordat de verkeersvraag groter is dan het aanbod. Analyse van de 17 simulatieruns heeft aangetoond dat 33 procent van de files ontstaat doordat de intensiteit groter is dan de capaciteit. In de overige 67 procent van de runs ontstaat de file doordat voertuigen die willen invoegen geen voldoende groot hiaat kunnen vinden en daardoor met lage snelheid invoegen (zie tabel 1).

Tabel 1: Oorzaken voor het ontstaan van file in de referentiesituatie.

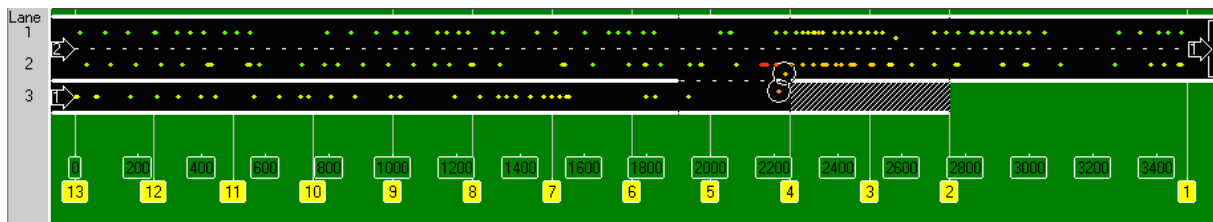
Initiële oorzaak	Simulatie run	Totaal
Vraag groter dan capaciteit	1/3/4*/14/16/17	6 (33%)
Invoegend voertuig met lage snelheid	2/4*/5/6/7/8/9/10/11/12/13/15	12 (67%)

\* File ontstaat eerst op ongeveer 3000 meter, dus na de bottleneck, maar vrijwel direct ontstaat er ook een file op ongeveer 2000 meter als gevolg van een invoegend voertuig met een lage snelheid.

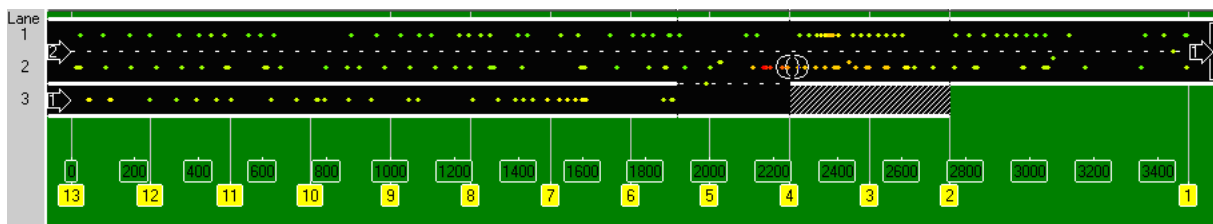
In de vier onderstaande figuren is voor run 6 schematisch weergegeven hoe de file ontstaat doordat voertuigen die willen invoegen geen voldoende hiaat vinden. De twee omcirkelde voertuigen willen invoegen, maar ondervinden te veel hinder van de voertuigen op de rechtersrijstrook (figuur 23.1). De voertuigen die willen invoegen worden gedwongen om de voertuigen op de hoofdrijbaan te laten passeren en vervolgens in te voegen met een lage snelheid (figuur 23.2 en 23.3). Op dat moment is het begin van de file gecreëerd, terwijl stroomopwaarts op de hoofdrijbaan nog ruimte beschikbaar is en de capaciteit nog niet bereikt is. De twee ingevoegde voertuigen rijden uiteindelijk stroomafwaarts zonder al te veel vertraging onder vonden te hebben, terwijl het overige verkeer stroomopwaarts van de file te maken krijgt met een verstoorde doorstroming (figuur 23.4).



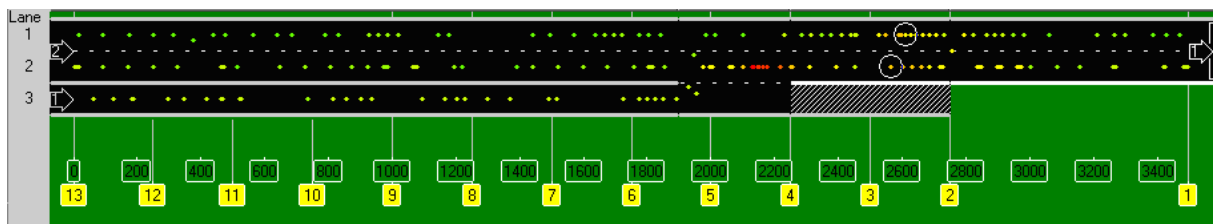
Figuur 23.1: Schematische weergave ontstaan file als gevolg van invoegende voertuigen (tijdstap 3661,0).



Figuur 23.2: Schematische weergave ontstaan file als gevolg van invoegende voertuigen (tijdstap 3670,0).

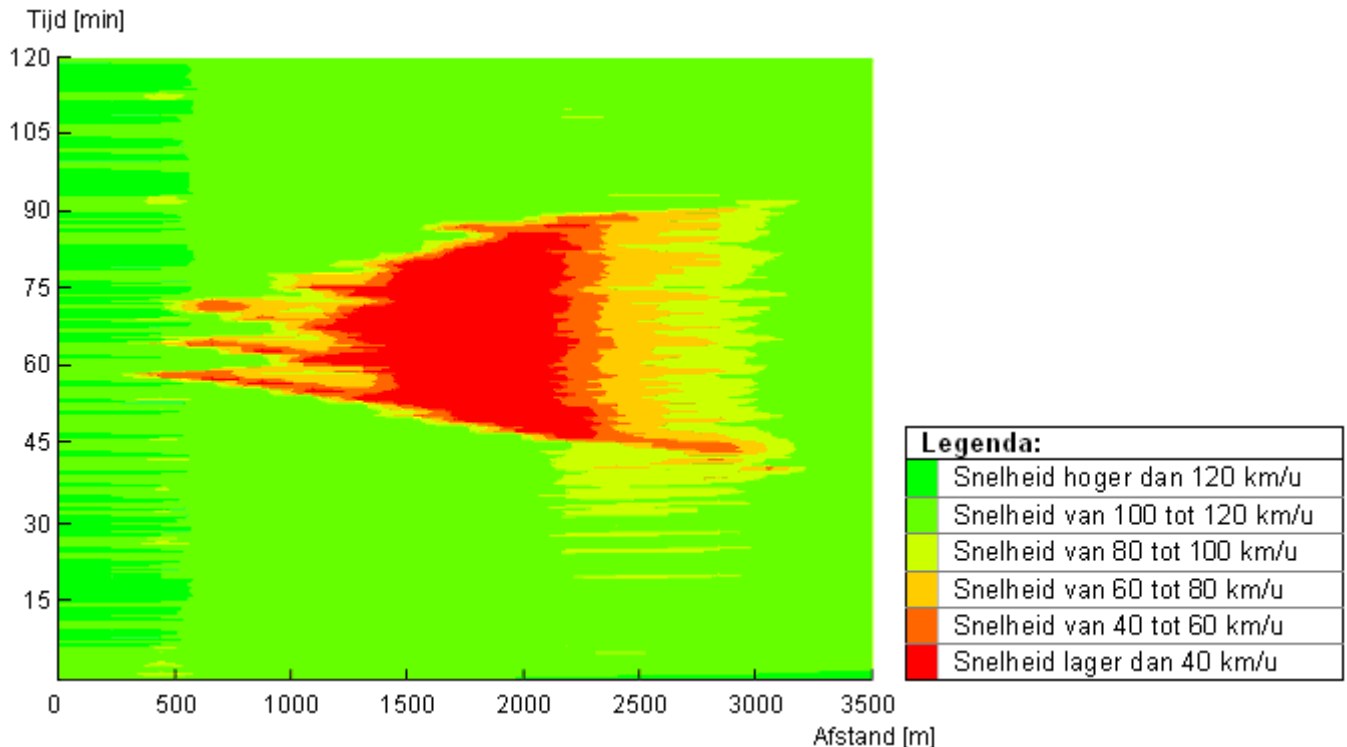


Figuur 23.3: Schematische weergave ontstaan file als gevolg van invoegende voertuigen (tijdstap 3672,5).



Figuur 23.4: Schematische weergave ontstaan file als gevolg van invoegende voertuigen (tijdstap 3690,5).

Files als gevolg van de invoegende voertuigen en de te grote verkeersvraag hebben er voor gezorgd dat de reistijd toeneemt. De gemiddelde totale verliestijd over de 17 runs van de referentiesituatie bedraagt dan ook ongeveer 96 uur. Daarnaast gaan files gepaard met schokgolven als gevolg van het onrustige optrekken en afremmen (zie figuur 24). In de 17 simulatieruns zijn in totaal 52 schokgolven waargenomen met een gemiddelde lengte van ongeveer 850 meter (zie bijlage 4).



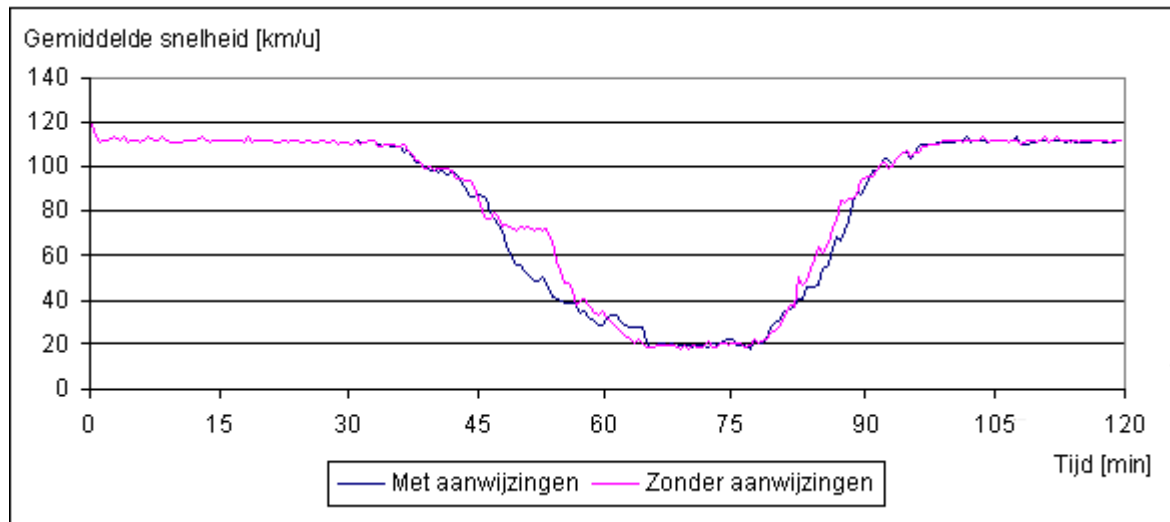
Figuur 24: Overzicht van de schokgolven in de derde simulatierun van de referentiesituatie.

De bovenstaande resultaten geven een overzicht van het verkeersbeeld wanneer er geen aanwijzingen gegeven worden. Daaruit blijkt onder andere dat vaak file ontstaat als gevolg van langzaam invoegende voertuigen en dat in de referentiesituatie regelmatig schokgolven voorkomen. In de volgende twee paragrafen wordt de doorstroming, gemiddelde totale verliestijd en stabiliteit van de beide verkeerssituaties vergeleken met de resultaten uit de referentiesituatie.

## 7.2 Anticipatie op langzame voorliggers

Zoals in paragraaf 6.2 beschreven is, krijgen voertuigen in dit scenario een aanwijzing zodra een ander voertuig binnen een afstand van 500 meter met een snelheid lager dan 60 km/u rijdt. Ten aanzien van de doorstroming blijkt uit figuur 25 dat de ruim 2300 aanwijzingen per run niet tot grote verschillen in het gemiddelde snelheidsverloop over de 17 runs hebben geleid. De belangrijkste verschillen zitten in het verloop van de daling van de gemiddelde snelheid en het tijdstip waarop de laagste snelheid in de file bereikt wordt. Doordat voertuigen eerder anticiperen en het gas los laten daalt de gemiddelde snelheid sterker dan in de referentiesituatie, waardoor na 47 minuten een verlies in doorstroming optreedt. Dit verlies kan echter niet voldoende gecompenseerd worden door de winst die geboekt wordt doordat iets langer met een hogere snelheid doorgereden kan worden voordat de gemiddelde snelheid zakt naar 20 km/u.

Uit het verschil in snelheidsverloop per run blijkt eveneens dat in slechts 3 van de 17 runs een verbetering ontstaat, terwijl in 6 runs een verslechtering optreedt. In 8 runs blijft het snelheidsverloop ongeveer gelijk (zie bijlage 5).



Figuur 25: Gemiddeld snelheidsverloop over de 17 simulatieruns voor zowel de referentiesituatie als de situatie met aanwijzingen om eerder te anticiperen op langzame voorliggers.

De negatieve effecten voor de doorstroming komen ook naar voren bij de bepaling van de gemiddelde totale verliestijd. De gemiddelde totale verliestijd over de 17 runs neemt toe tot ongeveer 104 uur, wat overeenkomt met een toename van 9 procent. Uit de paarsgewijze vergelijking blijkt dat deze toename niet significant is bij een betrouwbaarheid van 95 procent.

De resultaten ten aanzien van de stabiliteit geven echter een aanzienlijke verbetering doordat de snelheidsverschillen flink worden gereduceerd als gevolg van de aanwijzingen. De schokgolven nemen zowel in aantal, van 52 naar 21, als in gemiddelde lengte, van ongeveer 850 naar 500 meter, aanzienlijk af (zie tabel 2 en bijlage 6). Deze afname kan echter niet los worden gezien van de verminderde doorstroming en de toegenomen gemiddelde totale verliestijd.

Tabel 2: Overzicht van de schokgolven voor zowel de referentiesituatie als de situatie met aanwijzingen om eerder te anticiperen op langzame voorliggers.

Referentiesituatie:		Anticiperen op langzame voorliggers:	
Totaal	Gemiddelde lengte	Totaal	Gemiddelde lengte
52 schokgolven	ongeveer 850 meter	21 schokgolven	ongeveer 500 meter

Dat de aanwijzingen om eerder te anticiperen wel degelijk een positief effect op de doorstroming en de gemiddelde totale verliestijd kunnen hebben, blijkt uit de gevoeligheidsanalyse. Door de parameter van 60 km/u te verlagen, zodat aanwijzingen pas gegeven worden bij lagere snelheden van het langzame voertuig, neemt het risico toe dat ingegrepen wordt als de snelheid al te ver afgenomen is. Het aantal aanwijzingen blijkt inderdaad te dalen naar ongeveer 1300 per run (zie tabel 3). Tevens levert het verlagen van de snelheid naar 50 en 40 km/u een winst op in de totale verliestijd van respectievelijk 29,8 en 20,4 uur. Uit de paarsgewijze vergelijking blijkt echter dat ook deze afname van de totale verliestijd niet significant verschilt van de referentiesituatie. De lagere winst bij 40 km/u geeft aan dat deze snelheid te laag is en dat de optimale parameterinstelling in de buurt van de 50 km/u ligt. Dat de afname van de gemiddelde totale verliestijd niet veroorzaakt wordt door enkele positieve uitschieters, blijkt uit het feit dat in respectievelijk 9 en 7 van de 17 runs de doorstroming verbetert.

Tabel 3: Overzicht van de resultaten van de verschillende parameterinstellingen om eerder te anticiperen op langzame voorliggers.

Parameters	Doorstroming			Gemiddelde totale verliestijd			Aantal aanwijzingen
	Beter	Gelijk	Slechter	Verliestijd	Verschil	t-waarde*	
<i>Zonder aanwijzingen</i>				95,6 uur			
500 m – 60 km/u	3	8	6	104,4 uur	8,8 uur	0,73	2323
500 m – 50 km/u	9	6	2	65,8 uur	-29,8 uur	1,85	1322
500 m – 40 km/u	7	7	4	75,2 uur	-20,4 uur	1,55	1419
400 m – 60 km/u	3	7	7	119,7 uur	24,1 uur	1,80	2336
600 m – 60 km/u	5	6	6	88,8 uur	-6,8 uur	0,38	2133

\* Er is sprake van een significant verschil bij een t-waarde groter dan 2,120 (zie paragraaf 6.3).

De waarde van de afstand waarmee vooruit gekeken wordt, blijkt minder invloed te hebben op de resultaten. Het aantal aanwijzingen verandert niet veel ten opzichte van de basissituatie en de toename van 500 naar 600 meter leidt tot een kleine positieve verbetering van de gemiddelde totale verliestijd. Deze afname met bijna 7 uur is geen significante verbetering ten opzichte van de referentiesituatie. Dat deze verbetering minimaal is, blijkt ook uit het effect op de doorstroming. In 5 van de 17 runs verbetert de doorstroming, maar in 6 runs blijft de doorstroming ongeveer gelijk en in 6 runs verslechtert deze.

Wanneer de afstand echter verkleind wordt naar 400 meter, blijkt dat deze afstand te kort is om in voldoende mate te kunnen anticiperen. De doorstroming en gemiddelde totale verliestijd verslechteren hierdoor aanzienlijk.

Het effect van de parameterwijzigingen op het aantal en de lengte van de schokgolven is in onderstaande tabel weergegeven. Het blijkt dat een wijziging van de snelheid van het langzame voertuig van 60 km/u naar zowel 50 als 40 km/u een zeer minimaal effect heeft op de schokgolven. De wijziging van de afstand waarover vooruit gekeken wordt naar langzame voertuigen, van 500 meter naar 400 en 600 meter, heeft geleid tot een minimale toename van de schokgolven. Geconcludeerd kan worden dat de parameterwijzigingen minimaal effect hebben op het aantal en de lengte van de schokgolven.

Tabel 4: Overzicht van het aantal en de lengte van de schokgolven voor de verschillende parameterinstellingen.

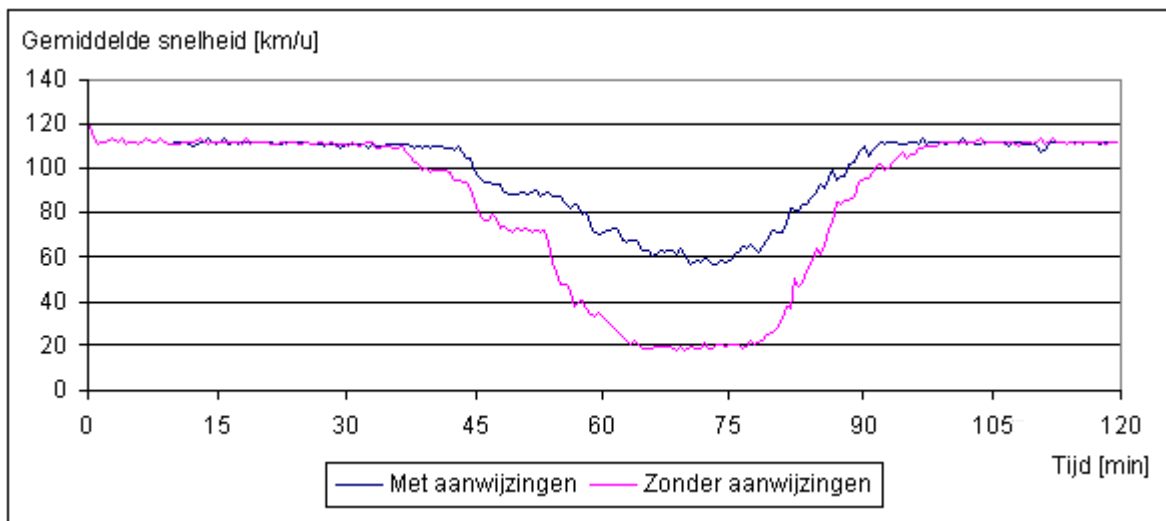
Parameters	Aantal schokgolven	Gemiddelde lengte
<i>Zonder aanwijzingen</i>	52 schokgolven	ongeveer 850 meter
500 m – 60 km/u	21 schokgolven	ongeveer 500 meter
500 m – 50 km/u	19 schokgolven	ongeveer 500 meter
500 m – 40 km/u	22 schokgolven	ongeveer 550 meter
400 m – 60 km/u	35 schokgolven	ongeveer 600 meter
600 m – 60 km/u	26 schokgolven	ongeveer 550 meter

Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat het geven van aanwijzingen om eerder te anticiperen op langzamere voertuigen een niet significante verbetering van de doorstroming en totale verliestijd tot gevolg heeft. Daarbij kan de winst verbeterd worden door met name de parameter voor de snelheid van het langzamere voertuig te optimaliseren. De grootste winst in dit scenario wordt echter geboekt doordat de snelheidsverschillen sterk afnemen. Hierdoor daalt het aantal en de lengte van de schokgolven aanzienlijk en zorgt het voor een verbetering van de verkeersveiligheid.

### 7.3 Invoegen met lage snelheid als gevolg van een platoon

In het tweede scenario zijn de aanwijzingen er op gericht om voertuigen die willen invoegen minder hinder te laten ondervinden van de platoons op de rechterrafstrook. De resultaten van de referentiesituatie toonden al aan dat in 67 procent van de simulatieruns file ontstaat als gevolg van de invoegende voertuigen, dus het is de verwachting dat het tegengaan van deze problemen in ieder geval tot een aanzienlijke verbetering van de doorstroming zal leiden. Uit het gemiddelde snelheidsverloop in figuur 26 blijkt direct al dat, de ongeveer 120 aanwijzingen per run, tot een sterke toename van de doorstroming hebben geleid. De aanwijzingen in het begin van de simulatie zorgen voor een uitstel van de congestie met bijna 7 minuten, waardoor langer met een gemiddelde snelheid van rond de 115 km/u doorgereden wordt. Tevens daalt de gemiddelde snelheid tijdens de congestie veel minder dan in de referentiesituatie, waardoor de file aanzienlijk vermindert.

Dat de verbetering van de doorstroming niet wordt veroorzaakt in slechts enkele runs, blijkt uit de analyse van de 17 afzonderlijke runs (zie bijlage 7). In 12 van de 17 runs treedt er namelijk een verbetering op van de doorstroming. In de overige runs is er 3 keer sprake van een verslechtering en 2 keer blijft de doorstroming ongeveer gelijk.



Figuur 26: Gemiddeld snelheidsverloop over de 17 simulatieruns voor zowel de referentiesituatie als de situatie met aanwijzingen om het platoon beter te spreiden.

Het positieve effect op de doorstroming komt ook tot uiting bij de vergelijking van de gemiddelde totale verliestijd. In de referentiesituatie bedroeg de gemiddelde totale verliestijd ongeveer 96 uur, maar in dit scenario is dit meer dan gehalveerd tot 43,6 uur. De paarsgewijze vergelijking van de simulatieruns toont aan dat deze afname van 52 uur statistisch significant verschilt van de referentiesituatie bij een betrouwbaarheid van 95 procent.

Waar de aanwijzingen om eerder te anticiperen op langzame voorliggers vooral een positief effect hadden op de afname van de schokgolven, blijkt uit tabel 5 dat de aanwijzingen om het platoon beter te spreiden ook tot een afname hebben geleid. Het aantal schokgolven in de 17 runs is afgenomen tot 28 en hebben daarbij een gemiddelde lengte van ongeveer 650 meter (zie bijlage 8). Geconcludeerd kan worden dat de aanwijzingen met betrekking tot de betere spreiding van de platoons dus een positief effect hebben op zowel de doorstroming en totale verliestijd als de stabiliteit.

Tabel 5: Overzicht van de schokgolven voor zowel de referentiesituatie als de situatie met aanwijzingen om het platoon beter te spreiden.

Referentiesituatie:		Betere spreiding platoon:	
Totaal	Gemiddelde lengte	Totaal	Gemiddelde lengte
52 schokgolven	ongeveer 850 meter	28 schokgolven	ongeveer 650 meter

Om te bepalen wat de invloed van de verschillende parameters is op bovenstaande resultaten, zijn zes varianten gesimuleerd waarbij telkens één parameter gewijzigd is (zie tabel 6). In de eerste plaats is bepaald welke invloed de voorwaarden hebben die bepalen wanneer er sprake is van een platoon. Twee simulaties zijn uitgevoerd waarbij aanwijzingen zijn gegeven als de vier voertuigen niet binnen 150 meter, maar binnen 180 respectievelijk 100 meter van elkaar reden. Wanneer de vier voertuigen zich binnen 180 meter van elkaar bevinden, worden bijna twee zo veel aanwijzingen gegeven. Het blijkt echter dat vaak onnodig aanwijzingen gegeven worden, want de doorstroming en gemiddelde totale verliestijd nemen sterk toe ten opzichte van de situatie waarin de vier voertuigen binnen 150 meter rijden. Dit komt met name doordat relatief veel aanwijzingen gegeven worden aan voertuigen die al een grotere volgafstand hadden. Door deze volgafstanden nog verder te vergroten, weegt de winst van het eenvoudiger invoegen niet meer op tegen het capaciteitsverlies.

Wanneer de aanwijzingen pas gegeven worden als de vier voertuigen binnen 100 meter van elkaar rijden, blijkt dat zelden aan deze voorwaarden voldaan wordt tijdens de simulatie. Het aantal aanwijzingen daalt tot 33 per run waardoor het verschil ten opzichte van de referentiesituatie minimaal is.

Vervolgens is de invloed van de volgafstand onderzocht door de  $z_2$ -waarde te wijzigen van 1,5 naar 1,8. De vergroting van de volgafstand heeft tot gevolg dat de doorstroming en de gemiddelde totale verliestijd verbeteren, maar in mindere mate dan bij een  $z_2$ -waarde 1,5. De winst voor voertuigen om met een hogere snelheid in te kunnen voegen weegt dus niet op tegen het verlies aan capaciteit dat ontstaat.

Tabel 6: Overzicht van de resultaten van de verschillende parameterinstellingen om het platoon beter te spreiden.

Parameters	Doorstroming			Gemiddelde totale verliestijd			Aantal aanwijzingen
	Beter	Gelijk	Slechter	Verliestijd	Verskil	t-waarde*	
<i>Zonder aanwijzingen</i>				95,6 uur			
basisinstellingen	12	2	3	43,6 uur	-52,0 uur	2,66	116
4 vtg binnen 180m	6	2	9	102,8 uur	7,2 uur	0,30	226
4 vtg binnen 100m	5	8	4	91,9 uur	-3,7 uur	0,29	33
$z_2$ 1,8 i.p.v. 1,5	10	3	4	70,8 uur	-24,8 uur	1,56	125
hiaat 100 i.p.v. 75m	6	5	6	98,9 uur	3,3 uur	0,19	77
3 vtg terugkijken	11	4	2	43,8 uur	-51,8 uur	3,03	109
2250 i.p.v. 1900m	7	4	6	110,2 uur	14,6 uur	0,78	902

\* Er is sprake van een significant verschil bij een t-waarde groter dan 2,120 (zie paragraaf 6.3).

Tevens is onderzocht welke invloed het hiaat achter het platoon heeft. In de eerste plaats is de parameter aangepast waardoor pas bij een hiaat van 100 meter een aanwijzing gegeven wordt. Doordat er niet vaak sprake is van een hiaat van minimaal 100 meter achter een platoon, worden er weinig aanwijzingen gegeven. Hierdoor wijken de uitkomsten minimaal af van de resultaten uit de referentiesituatie.

Niet alleen de invloed van de grootte van het hiaat is bepaald, maar ook de invloed van de positie van het hiaat. In de simulatie met de basisinstellingen worden aanwijzingen gegeven wanneer binnen vier voertuigen achter het platoon een hiaat is. Wanneer echter al aanwijzingen gegeven worden als het hiaat van 75 meter zich binnen drie voertuigen bevindt, blijkt dat hiermee bijna

geen verschil ontstaat. Er kan dus geconcludeerd worden dat bij de meeste aanwijzingen het hiaat zich binnen drie voertuigen achter het platoon bevindt. Dit zorgt er dus voor dat niet veel andere weggebruikers hinder ondervinden van het vergroten van de volgafstand in het platoon.

Tot slot is bepaald wat het effect is wanneer platoons die zich al in het invoeggebied bevinden ook een aanwijzing krijgen. De resultaten in tabel 6 tonen aan dat dit een duidelijke verslechtering van de verkeerssituatie oplevert, waarbij de gemiddelde totale verliestijd zelfs slechter is dan in de situatie zonder dat er aanwijzingen gegeven werden. De belangrijkste oorzaak hiervan is het feit dat in het invoeggebied veel platoons voorkomen als gevolg van de invoegende voertuigen en de tijdelijke acceptatie van kleinere hiaten. Het aantal aanwijzingen is dan ook gestegen tot ruim 900 per simulatierun. Het nadeel van het geven van aanwijzingen aan voertuigen in het invoeggebied is dat zij enerzijds weinig tijd hebben om een voldoende hiaat te creëren voor het invoegende voertuig. Anderzijds hebben deze voertuigen wel een groter te hanteren hiaat ten tijde van de bottleneck, waardoor de doorstroming wordt beperkt. Tot slot zorgen de aanwijzingen in het invoeggebied voor extra onrust in de verkeersstroom waardoor dit de doorstroming negatief beïnvloed.

Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat de gewijzigde parameterinstellingen in dit scenario niet tot een verbetering van het resultaat hebben geleid. De basisinstellingen hebben aangetoond dat een aanzienlijk positief en significant effect bereikt wordt door invoegende voertuigen minder hinder te laten ondervinden van de platoons.

## 7.4 Conclusies

Op basis van de resultaten van de simulaties kan geconcludeerd worden dat het tegengaan van suboptimaal weggebruik door individuele voertuigen een aanwijzing te geven tot een verbetering van de verkeerssituatie leidt. De aanwijzing om eerder te anticiperen op langzamere voorliggers toont aan dat vooral de stabiliteit flink verbeterd. De doorstroming en totale verliestijd verbeterd, maar er is met de paarsgewijze vergelijking echter geen significante verbetering geconstateerd.

De aanwijzing om platoons beter te spreiden zodat zij invoegende voertuigen niet belemmeren, heeft aangetoond dat de doorstroming aanzienlijk verbeterd en de totale verliestijd significant afneemt. Daarbij is tevens aangetoond dat het aantal en de lengte van de schokgolven aanzienlijk verkleind wordt.

In het volgende hoofdstuk wordt een uitgebreid overzicht van de conclusies beschreven die op basis van dit onderzoek getrokken kunnen worden en worden enkele aanbevelingen beschreven voor verder onderzoek naar MDVM.



## Hoofdstuk 8: Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk bevat de conclusies en aanbevelingen die op basis van dit onderzoek naar MDVM getrokken kunnen worden. Aan de hand van de resultaten van de simulaties wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag zoals die in hoofdstuk 1 gesteld is. Daarnaast worden conclusies getrokken over onder andere de robuustheid van de uitkomsten en de implementatie van MDVM. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met enkele aanbevelingen voor verder onderzoek naar MDVM.

### Conclusies

Zoals in het eerste hoofdstuk beschreven is, luidt de hoofdvraag van dit onderzoek:

*“Wat is het effect van individuele aanwijzingen aan automobilisten op de doorstroming op het Nederlandse hoofdwegennet?”*

Voor de beantwoording van deze vraag is met simulaties het effect van individuele aanwijzingen voor twee typen aanwijzingen onderzocht. De simulaties hebben plaatsgevonden op een wegvak van het hoofdwegennet met een tweestrooks rijbaan en een enkelstrooks toerit. Het eerste type aanwijzing is gericht op het eerder anticiperen op langzamer rijdende voertuigen door het gas los te laten en passief af te remmen. Uit de simulaties blijkt dat het verlies aan capaciteit, doordat voertuigen eerder vertragen en daarmee een grotere volgafstand creëren, uiteindelijk voldoende gecompenseerd wordt doordat de snelheidsverschillen afnemen en de beschikbare infrastructuur beter benut wordt. De doorstroming verbetert en de totale verliestijd neemt met bijna 30 uur af. De paarsgewijze vergelijking van de 17 simulatieruns toont echter aan dat deze afname niet significant is bij een betrouwbaarheid van 95 procent. Er kan niet met de gewenste zekerheid vastgesteld worden dat de aanwijzingen ook daadwerkelijk tot een afname van de totale verliestijd leidt.

De aanwijzingen leiden wel tot een belangrijke winst in de stabiliteit van de verkeersstroom. Doordat de snelheidsverschillen dalen is het aantal schokgolven met bijna 60 procent afgenomen en de gemiddelde lengte van de schokgolven met bijna 40 procent. Dit zorgt voor een verbetering van de verkeersveiligheid en tot een afname van de uitstoot van schadelijke stoffen.

De resultaten tonen aan dat de aanwijzingen een positief effect hebben op de mobiliteitsproblemen. Daarbij dient echter opgemerkt te worden dat de conclusies gebaseerd zijn op een verkeerssituatie met een specifiek wegontwerp en intensiteitsverloop. Andere verkeerssituaties leiden uiteraard tot andere conclusies, maar het is de verwachting dat de vormgeving van het wegontwerp weinig invloed heeft op het effect van de aanwijzingen om eerder te anticiperen op langzamere voorliggers. Het effect is afhankelijk van de aanwezigheid van langzamere voertuigen en vermoedelijk niet van de manier waarop deze tot stand komen.

Een verandering van de intensiteit zal daarentegen wel invloed hebben op het aantal aanwijzingen dat gegeven wordt en het effect ervan. Bij hogere intensiteiten rijden de voertuigen dichter op elkaar en is er dus meer sprake van volggedrag. Hierdoor anticiperen bestuurders vanuit zichzelf al eerder op snelheidsveranderingen van voorliggers, waardoor het aantal aanwijzingen en het effect op bijvoorbeeld de stabiliteit zal afnemen richting de referentiesituatie. Bij lagere intensiteiten is er minder snel sprake van langzamere voertuigen, maar als ze voorkomen zijn de aanwijzingen van groter belang vanwege de grotere snelheidsverschillen. Daarnaast heeft het capaciteitsverlies bij lagere intensiteiten minder negatieve gevolgen, waardoor het de verwachting is dat de aanwijzingen een positiever effect hebben.

Het tweede type aanwijzing is gericht op het beter spreiden van de platoons op de rechterrijstrook van de hoofdrijbaan. Hierdoor ontstaan grotere hiaten tussen de voertuigen in het platoon waardoor invoegende voertuigen met een hogere snelheid kunnen invoegen. De simulaties tonen aan dat deze aanwijzingen tot een aanzienlijke verbetering van de doorstroming leiden. Het duurt bijna 7 minuten langer voordat de congestie optreedt en de gemiddelde snelheid tijdens congestie daalt uiteindelijk niet tot 20 km/u zoals in de referentiesituatie, maar neemt af tot ongeveer 60 km/u. Hierdoor is niet alleen de file korter, maar kunnen de voertuigen ook sneller doorrijden. De gemiddelde totale verliestijd wordt dan ook meer dan gehalveerd tot bijna 44 uur. Uit de paarsgewijze vergelijking van de 17 runs blijkt dat met een betrouwbaarheid van 95 procent gesteld kan worden dat de aanwijzingen tot een significante afname van de totale verliestijd leiden.

Door de verbeterde doorstroming nemen de snelheidsverschillen af en daalt het aantal schokgolven. Uit de simulaties blijkt dat het aantal schokgolven bijna gehalveerd is en dat de gemiddelde lengte met ongeveer 25 procent afneemt. Zoals eerder beschreven zorgt deze afname voor een verbetering van de verkeersveiligheid en een afname van de uitstoot van schadelijke stoffen.

Aangezien het tweede type aanwijzing gebaseerd is op voertuigen die invoegen, is het niet op veel andere wegontwerpen toepasbaar. Bij het ritsen van drie naar twee rijstroken is wel sprake van invoegende voertuigen, maar vanwege het langere invoeggebied kunnen invoegende voertuigen beter een geschikt hiaat kiezen. Tevens zijn het de voertuigen op de linkerrijstrook die moeten invoegen en dit zijn meestal bestuurders die kleinere hiaten accepteren. Daardoor zullen zij ook eerder een hiaat accepteren en niet gedwongen worden om aan het eind van het invoeggebied af te remmen en met een lage snelheid in te voegen. Bij andere wegontwerpen zal dus weinig aan de voorwaarden voldaan worden om invoegende voertuigen grotere hiaten te bieden door de platoons beter te spreiden.

Een aanpassing van de intensiteit heeft echter wel gevolgen voor het effect van de aanwijzingen om de platoons beter te spreiden. Omdat elke aanwijzing een kleine verbetering van de doorstroming en stabiliteit tot gevolg heeft, is het effect van de aanwijzingen afhankelijk van het aantal gegeven aanwijzingen. Bij een toenemende intensiteit is op een bepaald moment geen sprake meer van het hiaat van 75 meter achter het platoon, terwijl een daling van de intensiteit tot een afname van het aantal platoons leidt. Een bepaalde intensiteit leidt tot een optimum in het aantal aanwijzingen en daarbij een maximaal effect van de doorstroming. Een klein aantal aanwijzingen heeft een minimaal effect, hetgeen in de buurt ligt van de referentiesituatie.

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op de simulatieresultaten, maar bij de toepassing van MDVM in de praktijk ontstaat nog een probleem dat vooral effect heeft op de verkeersveiligheid. Een aanwijzing zorgt er voor dat de aandacht van de bestuurder korte tijd afgeleid wordt van de primaire taak, namelijk het (veilig) besturen van het voertuig. Het is daarom van belang om een aanwijzing zo compact en doeltreffend mogelijk aan te bieden. Uit eerdere onderzoeken is gebleken dat de verkeersveiligheid het minst beïnvloed wordt als de bestuurder zelf kan beslissen op welk moment hij aandacht aan de aanwijzing besteedt. Het uitstellen van het opvolgen van de aanwijzing heeft uiteraard wel gevolgen voor het effect van de aanwijzing. Voor de verkeersveiligheid is een visuele aanwijzing door middel van het head-up display in het gezichtsveld van de bestuurder de beste oplossing. Vervolgonderzoek moet echter aantonen welk effect dit heeft voor de snelheid waarmee de aanwijzing opgevolgd wordt.

Op basis van de twee onderzochte vormen van suboptimaal weggebruik kan geconcludeerd kan worden dat het geven van individuele aanwijzingen tot een significante afname van de totale verliestijd met ruim 50 procent leidt. Daarnaast is aangetoond dat het aantal schokgolven met bijna 60 procent afneemt en de gemiddelde lengte met bijna 40 procent.

Voor een verdere verbetering van de doorstroming en het aantal schokgolven dient voor andere situaties van suboptimaal weggebruik eveneens onderzocht te worden of het geven van individuele aanwijzingen een positief effect heeft. De volgende paragraaf bevat een overzicht van de aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van MDVM.

### **Aanbevelingen**

In dit onderzoek is een aantal aannamen gesteld en is een aantal factoren buiten beschouwing gelaten. Het verdient dan ook de aanbeveling om in verder onderzoek naar het geven van individuele aanwijzingen aandacht te besteden aan de volgende factoren. In de eerste plaats is het van belang om te bepalen wat het effect van MDVM is in andere situaties van suboptimaal weggebruik op het hoofdwegennet. Bij de simulaties is uitgegaan van twee vormen van suboptimaal weggebruik, maar zoals beschreven is zijn er meerdere vormen van suboptimaal weggebruik. Vervolgonderzoek moet vaststellen met welke aanwijzingen andere vormen van suboptimaal weggebruik tegengegaan kunnen worden en wat het effect daarvan is op de doorstroming en stabiliteit.

Tevens is het van belang dat vervolgonderzoek vaststelt wat de invloed van andere wegontwerpen en intensiteiten is op het effect van de in dit onderzoek gesimuleerde aanwijzingen. In de conclusies is beschreven dat de gesimuleerde aanwijzingen bij een ander wegontwerp en intensiteit vermoedelijk ook tot een verbetering van de doorstroming en stabiliteit leidt. Vervolgonderzoek moet echter vaststellen wat de exacte gevolgen hiervan zijn op het effect van MDVM.

Ten derde verdient het de aanbeveling om te bepalen welke invloed de penetratiegraad, acceptatiegraad en reactietijd hebben op het effect van MDVM. Enerzijds zijn in de beginfase niet alle voertuigen uitgerust met de benodigde technieken voor MDVM en anderzijds zullen niet alle bestuurders de aanwijzingen ook daadwerkelijk en direct opvolgen. Vervolgonderzoek moet inzicht geven in hoeverre de penetratiegraad en reactietijd invloed hebben op het effect van de aanwijzingen.

Om er voor te zorgen dat zo veel mogelijk automobilisten de aanwijzingen daadwerkelijk opvolgen, verdient het de aanbeveling om bij de implementatie van MDVM onderscheid te maken in het individueel en algemeen belang. Automobilisten zullen geneigd zijn om een aanwijzing niet op te volgen, aangezien dit een (kleine) vertraging in de reistijd oplevert, maar als duidelijk is het voor de totale doorstroming van groot belang is, zal de bereidheid toenemen om de aanwijzing op te volgen.

Tot slot dient verder onderzoek verricht te worden naar de technische uitwerking van MDVM. Essentiële factoren zijn de nauwkeurige plaatsbepaling, de analyse van het suboptimaal weggebruik en de wijze waarop de aanwijzing kenbaar gemaakt wordt. Andere onderzoeken hebben aangetoond dat visuele aanwijzingen het meest effectief en verkeersveilig zijn, maar welke gevolgen heeft dit voor de snelheid waarmee de aanwijzing opgevolgd wordt en dus het effect van MDVM?

Dit onderzoek heeft aangetoond dat het geven van individuele aanwijzingen mogelijkheden biedt voor een betere doorstroming, maar dat onderzoek naar de bovenstaande aanbevelingen noodzakelijk is.

## Afkortingenlijst

ACC:	Adaptive cruise control
ADAS:	Advanced driver assistance systems
CO <sub>2</sub> :	Koolstofdioxide
DRIP:	Dynamisch route informatie paneel
DVM:	Dynamisch verkeersmanagement
Fosim:	Freeway operations simulation
GPS:	Global positioning system
GLONASS:	Global navigation satellite system
HWN:	Hoofdwegennet
I/C-verhouding:	Intensiteit-capaciteitverhouding
ICT:	Informatie- en communicatietechnologie
ITS:	Intelligente transportsystemen
LDWS:	Lane departure warning system
LZV:	Lange en zwaardere vrachtwagencombinatie
MDVM:	Micro dynamisch verkeersmanagement
NO <sub>x</sub> :	Stikstofoxide
OBU:	On board unit
PM <sub>10</sub> :	Fijnstof
RWS-AVV:	Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer
UMTS:	Universal mobile telecommunications system

## Literatuur

Arem, B. van, & E.A. Berghout, en G. Bootsma (2004), Who cares about advanced driver assistance? In: *Colloquium vervoersplanologisch speurwerk: Innovatie: van inspiratie naar realisatie*. Rotterdam: Colloquium vervoersplanologisch speurwerk, deel 2 p. 431 – 450.

Bovy, P.H.L. & S.P. Hoogendoorn (1999), *Recent advances in traffic flow modelling and control*. Delft: TRAIL Research School.

Cammen, H. van der, & L.A. de Klerk (1996), *Ruimtelijke ordening. Van plannen komen plannen: de ontwikkelingsgang van de ruimtelijke ordening in Nederland*. Utrecht: Het Spectrum, ISBN 90-274-8052-4.

CBS (2008a), “Luchtverontreiniging, emissies door alle bronnen”, [<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=37221&D1=0,6&D2=0-1,15&D3=a&HDR=G2,T&STB=G1&VW=T>]. In: *Centraal Bureau voor de Statistiek*, [<http://www.cbs.nl>]. Bezocht op 14 augustus 2008.

CBS (2008b), “Luchtverontreiniging, emissies door wegverkeer”, [<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=7063&D1=12,16,24&D2=0&D3=a&VW=T>]. In: *Centraal Bureau voor de Statistiek*, [<http://www.cbs.nl>]. Bezocht op 14 augustus 2008.

CBS (2008c), “Mobiliteit; voertuigenbezit naar achtergrondkenmerken”, [<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=37856&D1=5&D2=1-2&D3=0&D4=a&HDR=G3,G1&STB=G2,T&VW=T>]. In: *Centraal Bureau voor de Statistiek*, [<http://www.cbs.nl>]. Bezocht op 16 augustus 2008.

CROW (2008), *Schriftelijke cursus verkeerskunde; Verkeersonderzoek en –modellen*. Breda: CROW.

Dijker, T. & P. Knoppers (2006), *Fosim 5.1; Gebruikershandleiding*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen; Laboratorium voor verkeerskunde.

Dragutinovic, N., K.A. Brookhuis, M.P. Hagenzieker & V.A.W.J. Marchau (2005), *Behavioural effects of advanced cruise control use*. Leidschendam, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid.

Draskóczy, M. (1993), *Mandatory safety quality assurance. Hopes deliverable no. 11*. Lund: University of Lund.

Driel, C.J.G. van & B. van Arem (2006), *Impacts of a congestion assistant on driving behaviour, workload and acceptance*. Enschede: University of Twente.

Driel, C.J.G. van & B. van Arem (2010), The impact of a congestion assistant on traffic flow efficiency and safety in congested traffic caused by a lane drop. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* (vol. 14), nr. 4, p. 197 – 208.

Elbers, J.A.C.M. (2005), *Development of an indicator for traffic flow stability with application to ramp metering*. Enschede: Febodruk BV.

- Geerlings, H. & W.A. Hafkamp (2002), *Mobiliteit als uitdaging: een integrale benadering*. Rotterdam: Uitgeverij 010, ISBN 90-6450-499-7.
- Goudappel Coffeng (1996), *Veiligheid als criterium bij dynamisch verkeersmanagement*. Deventer: Goudappel Coffeng.
- Grontmij (2002), *Leidraad model- en evaluatiestudies benuttingsmaatregelen*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Guikink, D. (2005), The CIVITAS Initiative: Sustainable mobility in a European perspective. In: *Colloquium vervoersplanologisch speurwerk: Duurzame mobiliteit hot or not?* Rotterdam: Colloquium vervoersplanologisch speurwerk, p. 549 – 560.
- Gwilliam, K.M. & H. Geerlings (1992), *Research and technology strategy to help overcome the environmental problems in relation to transport (SAST study nr. 3)*. Brussel/Luxemburg: EEC.
- Hancock, P.A. & R. Parasuraman (1992), Human factors and safety in the design of intelligent vehicle-highway systems (IVHS). In: *Journal of safety research* (vol. 23), nr. 4, p. 181 – 198.
- Harms, L. (2003), *Mobiel in de tijd: Op weg naar een auto-afhankeijke maatschappij, 1975-2000*. Den Haag: Sociaal en Cultureel Planbureau, ISBN 90-377-0125-6.
- Harms, L. (2008), *Overwegend onderweg: de leefsituatie en de mobiliteit van Nederlanders*. Den Haag: Sociaal en Cultureel Planbureau, ISBN 978-90-377-0377-1.
- Hein, G.W. (2000), From GPS and GLONASS via EGNOS to Galileo: Positioning and navigation in the third millennium. In: *GPS solutions* (vol. 3), nr. 4, p. 39 – 47.
- Hoogendoorn, S.P. (2005), *Traffic flow theory and simulation: Dictaat beborende bij het college CT4821*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.
- Horst, A.R.A. van der & F.J.J.M. Steyvers (1994), *Verkeersgedrag in onderzoek*. Haren: Rijksuniversiteit Groningen, Verkeerskundig studiecentrum, ISBN 90-6807-293-5.
- Huisman, C. (2007), Overheid 'goochelt' met norm fijnstof. In: *De Volkskrant 05-07-2007*. Amsterdam: PCM Uitgevers.
- Immers, B. & M. Westerman (1996), *Analogieën met verkeer en vervoer met nadruk op dynamisch verkeersmanagement*. Delft: TNO Inro.
- Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (2009), *Mobiliteitsbalans 2009*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, ISBN 978-90-8902-058-1.
- Kerner, B.S. (1999), Theory of congested traffic flow: Self-organization without bottlenecks. In: *Transportation and traffic theory*. Amsterdam: Elsevier science publishing company, p. 147 – 171.
- Lambrechtsen, J.J. & M. Westerman (1993), *Dynamic traffic management in Nederland*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Laval, J.A. & L. Leclercq (2008), Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. In: *Transportation Research Part B* (vol. 42), nr. 6, p. 511 – 522.

May, A.D. (1990), *Traffic flow fundamentals*. Upper Saddle River: Prentice Hall, ISBN 0-13-926072-2.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007), *15 tips om files te verminderen*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2008), “Proef met lange en zwaardere vrachtwagens (LZV’s) positief”,  
[[http://www.verkeerenwaterstaat.nl/actueel/nieuws/proefmetlangeenzwaarderevrachtwagenslzv\\_spositief.aspx](http://www.verkeerenwaterstaat.nl/actueel/nieuws/proefmetlangeenzwaarderevrachtwagenslzv_spositief.aspx)]. In: *Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Nieuwsberichten*,  
[<http://www.verkeerenwaterstaat.nl/actueel/nieuws>]. Bezocht op 23 augustus 2008.

Morsink, P., C. Goldenbeld, N. Dragutinovic, V.A.W.J. Marchau, L. Walta & K.A. Brookhuis (2007), *Speed support through the intelligent vehicle*. Leidschendam, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid, ISBN 0-7844-0503-4.

Norusis, M.J. (2000), *SPSS 10.0 Guide to data analysis*. Upper Saddle River: Prentice Hall, ISBN 0-13-0292044.

Ortúzar, J. de Dios & L.G. Willumsen (2001), *Modelling transport*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-471-86110-3.

Port of Rotterdam (2008), “Totale goederenoverslag in de haven van Rotterdam”,  
[[http://www.portofrotterdam.com/nl/rotterdamse\\_haven/haven\\_in\\_cijfers/goederenoverslag/Grafiek\\_Goederenoverslag\\_tijdreeks.jsp](http://www.portofrotterdam.com/nl/rotterdamse_haven/haven_in_cijfers/goederenoverslag/Grafiek_Goederenoverslag_tijdreeks.jsp)]. In: *Port of Rotterdam*, [<http://www.portofrotterdam.nl>]. Bezocht op 16 augustus 2008.

Rijkswaterstaat (2006), *Visie verkeersmanagement 2007 – 2020*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2006), *Trends in mobiliteit 2005*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2007), *Nieuwe ontwerprichtlijn autosnelwegen*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, ISBN 90-3693-636-5.

Rijkswaterstaat (2009), “Inschatten van wegvakgegevens 2006”,  
[[http://www.rijkswaterstaat.nl/dvs/Images/Inweva2006\\_2\\_tcm178-156732.xls](http://www.rijkswaterstaat.nl/dvs/Images/Inweva2006_2_tcm178-156732.xls)]. In: *Rijkswaterstaat*, [<http://www.rws.nl>]. Bezocht op 7 februari 2009.

Sheridan, T.B. (1991), Human factors of driver-vehicle interaction in the IVHS environment. In: *Technical report DOT HS 807 837*. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Soest, J. van (1997), *Elementaire statistiek*. Delft: Delftse universitaire pers, ISBN 90-407-1270-0.

Spit, W., M. Ludeking & H. Stoelhorst, *Lucht: Een dynamisch dossier vraagt om een dynamische aanpak!* Rotterdam: DVM-congres 2007.

Turksma, S. (2007), *Vlotter, schoner en veiliger met coöperatieve systemen*. Rotterdam: DVM-congres 2007.

Verwey, W.B. (1993), How can we prevent overload of the driver? In: *Driving future vehicles*, p. 235 – 244. Londen: Taylor & Francis.

Wee, B. van & M. Dijkstra (2002), *Verkeer en vervoer in hoofdlijnen*. Bussum: Coutinho, ISBN 90-6283-292-X.

Westerman, M., M.J.M. van der Vlist & A.J. Vieveen (1998), *DVM 2000: Operationalisering van dynamisch verkeersmanagement*. Delft: TNO Inro.

Wiedemann, R. (1974), *Traffic flow simulation*. Karlsruhe: Schriftenreihe des instituts für verkehrswesen der universität Karlsruhe.

Zuylen, H.J. van, M. Bliemer, Y.S. Chen, S.P. Hoogendoorn, J.W.C. van Lint, Th.H.J. Muller, H. Taale & F. Zuurbier (2006), *ITS and dynamic traffic management: Dictaat behorende bij het college CT5804*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.



## Bijlage 1: Overzicht verkeersmodellen

Model:	Microscopisch	HWN	Routekeuze	Dynamisch	Schaalniveau
Aimsun	Ja	Ja	Ja	Ja	Lokaal/streng/netwerk
Contram	Nee	Nee	Ja	Ja	Netwerk
Dynasmart	Nee	Ja	Ja	Ja	Netwerk
Flexsy	Ja	Nee	Nee	Ja	Lokaal/streng/netwerk
FlowSim.	Nee	Ja	Nee	Ja	Netwerk
Fosim	Ja	Ja	Nee	Ja	Lokaal/streng
Freq	Nee	Ja	Nee	Ja	Streng
Integration	Ja	Ja	Ja	Ja	Streng/netwerk
LMS	Nee	Nee	Ja	Nee	Netwerk
Metanet	Nee	Ja	Ja	Ja	Streng/netwerk
Mixic	Ja	Ja	Nee	Ja	Lokaal
NRM	Nee	Nee	Ja	Nee	Netwerk
Omnitrans	Nee	Nee	Ja	Nee	Netwerk
Paramics	Ja	Ja	Ja	Ja	Netwerk
Questor	Nee	Nee	Ja	Nee	Netwerk
Saturn	Nee	Nee	Ja	Ja	Netwerk
Trips	Nee	Nee	Ja	Nee	Netwerk
Vissim	Ja	Ja	Ja	Ja	Streng/netwerk

(CROW, 2008 en Grontmij, 2002)

## Bijlage 2: Parameterinstellingen Fosim

Voertuig-bestuurdercombinatie (voertuigtype)		Personenauto's			Vrachtauto's	
		1	2	3	4	5
<b>Parameters per voertuig-bestuurdercombinatie</b>						
Wensnelheid						
Bij een maximumsnelheid van 120 km/u	[km/u]	125	115	100	95	85
Bij een maximumsnelheid van 70 km/u	[km/u]	95	85	75	75	75
Max. pos. sprong in acceleratie	[m/s <sup>3</sup> ]	1	0,6	0,6	0,5	0,4
Volgfactor $Z_2$	[s]	0,56	0,72	1,28	2,08	2,23
Max. acceleratie	[m/s <sup>2</sup> ]	4,0	2,4	2,4	1,0	0,4
Max. volgdeceleratie	[m/s <sup>2</sup> ]	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
Max. strookwisseldeceleratie	[m/s <sup>2</sup> ]	-3	-2,4	-2,4	-2,0	-1,6
Max. deceleratie	[m/s <sup>2</sup> ]	-7,0	-7,0	-7,0	-6,0	-6,0
Voertuiglengte	[m]	4,5	4	4	8	14
Volgfactor $Z_1$	[m]	3	3	3	3	3
Volgfactor $Z_3$	[s <sup>2</sup> /m]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Gemiddeld specifiek vermogen	[kW/ton]	80	50	35	12	9
Standaardafwijking specifiek vermogen	[kW/ton]	0	0	0	5	5
Luchtweerstandscoefficiënt	[km <sup>-1</sup> ]	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
Maximale deceleratie bij verkeerslichten	[m/s <sup>2</sup> ]	-3,5	-3,5	-3,0	-3,0	-2,5
<b>Algemeen geldige parameters (niet per voertuigtype)</b>						
Strookwisseltijd	[s]	3				
Reactietijd voor acceleratie	[s]	0,30				
Reactietijd voor deceleratie	[s]	0,20				

(Dijker en Knoppers, 2006)

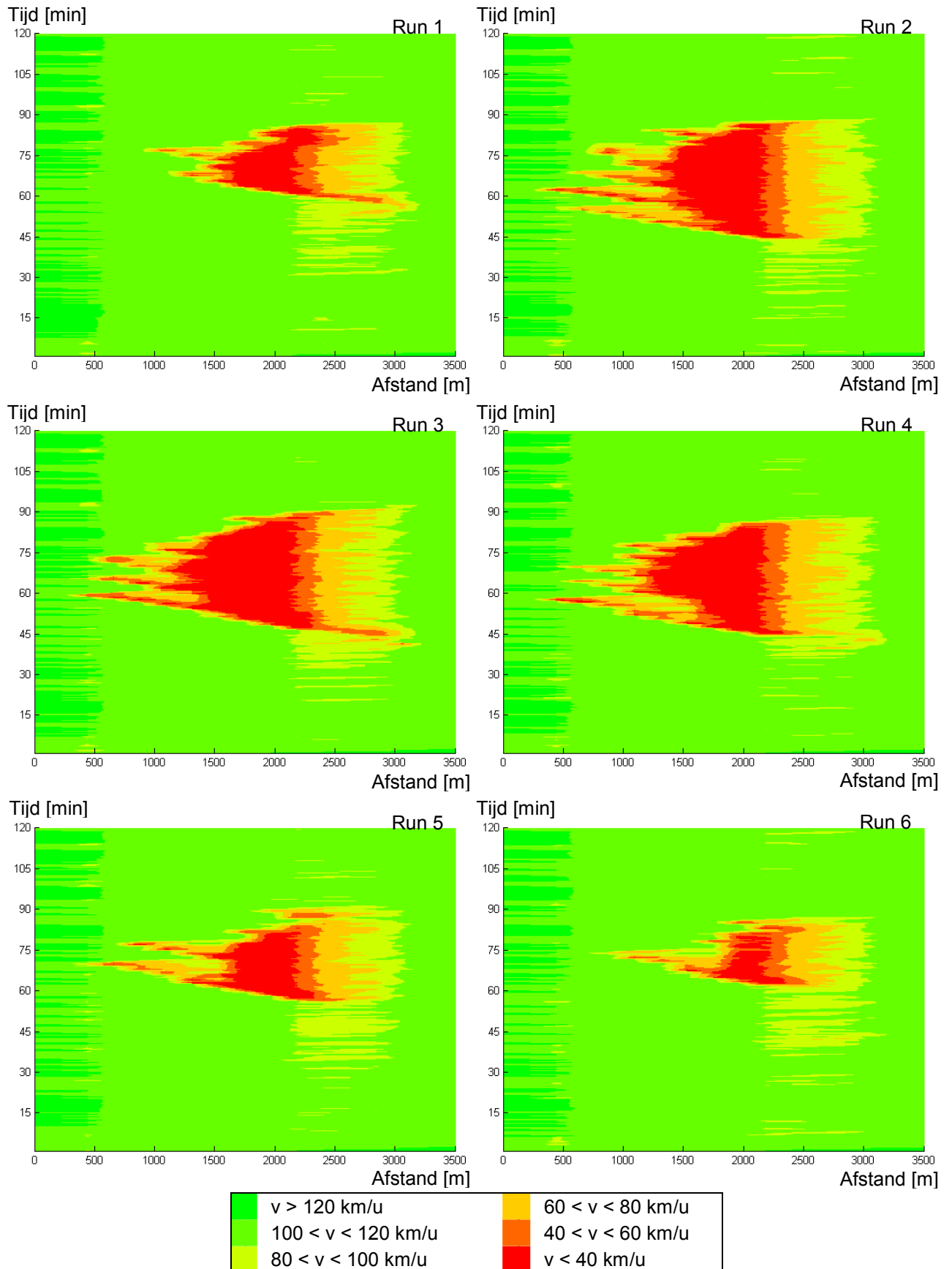
### Bijlage 3: Bepaling aantal simulatieruns

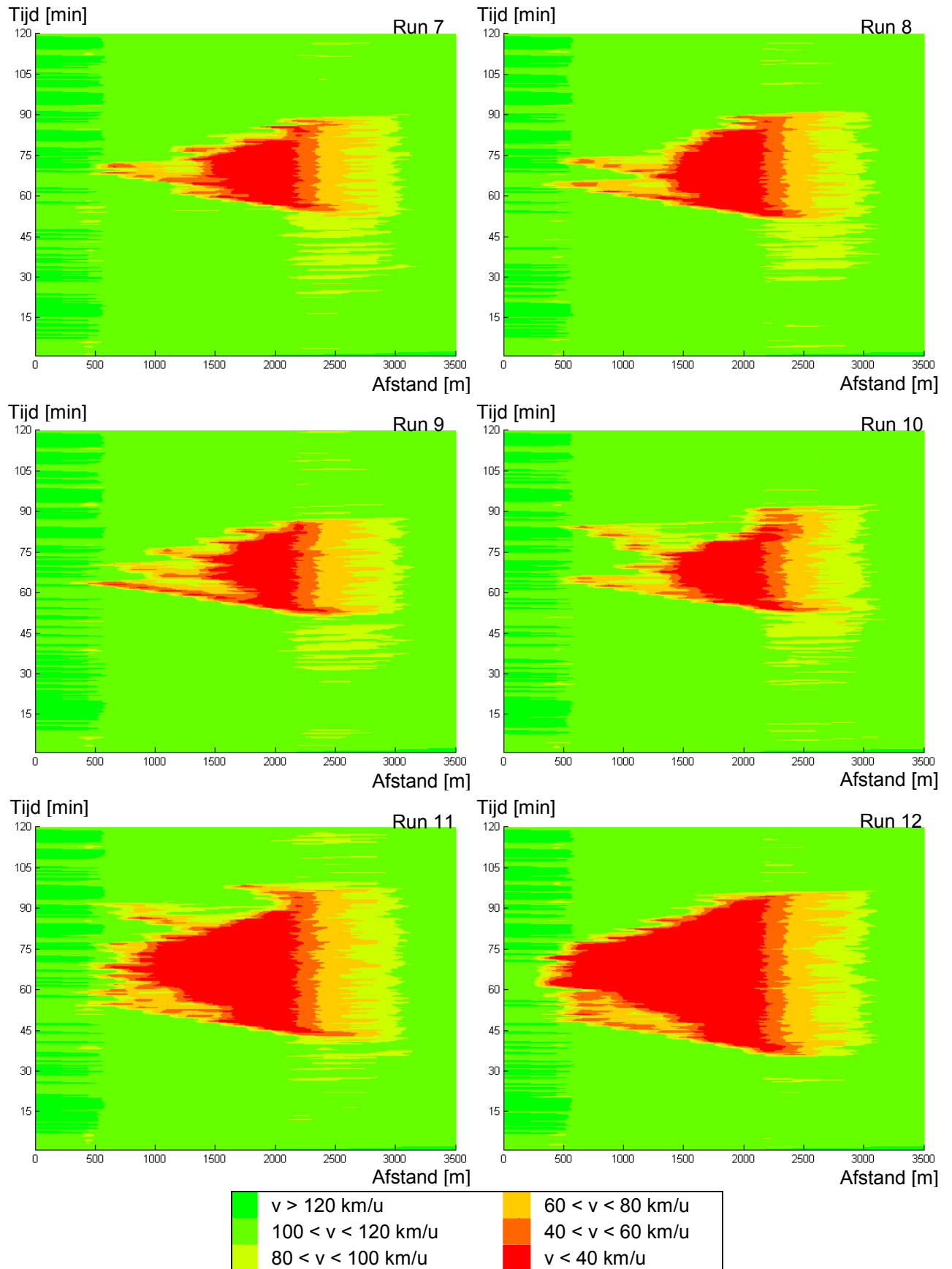
Als gevolg van het verschil in aantal waarnemingen per rijstrook fluctueert het gemiddelde en de standaardafwijking. Hierdoor varieert het aantal simulatieruns bij de berekening per rijstrook (zie onderstaande tabel). Doordat op rijstrook 3 (de toerit) het aantal waarnemingen dusdanig laag is, is deze rijstrook buiten beschouwing gelaten voor de bepaling van het aantal simulatieruns per scenario. De overige uitkomsten komen uit tussen de 4,4 en 16,9 runs, waardoor gekozen is om 17 runs per scenario uit te voeren.

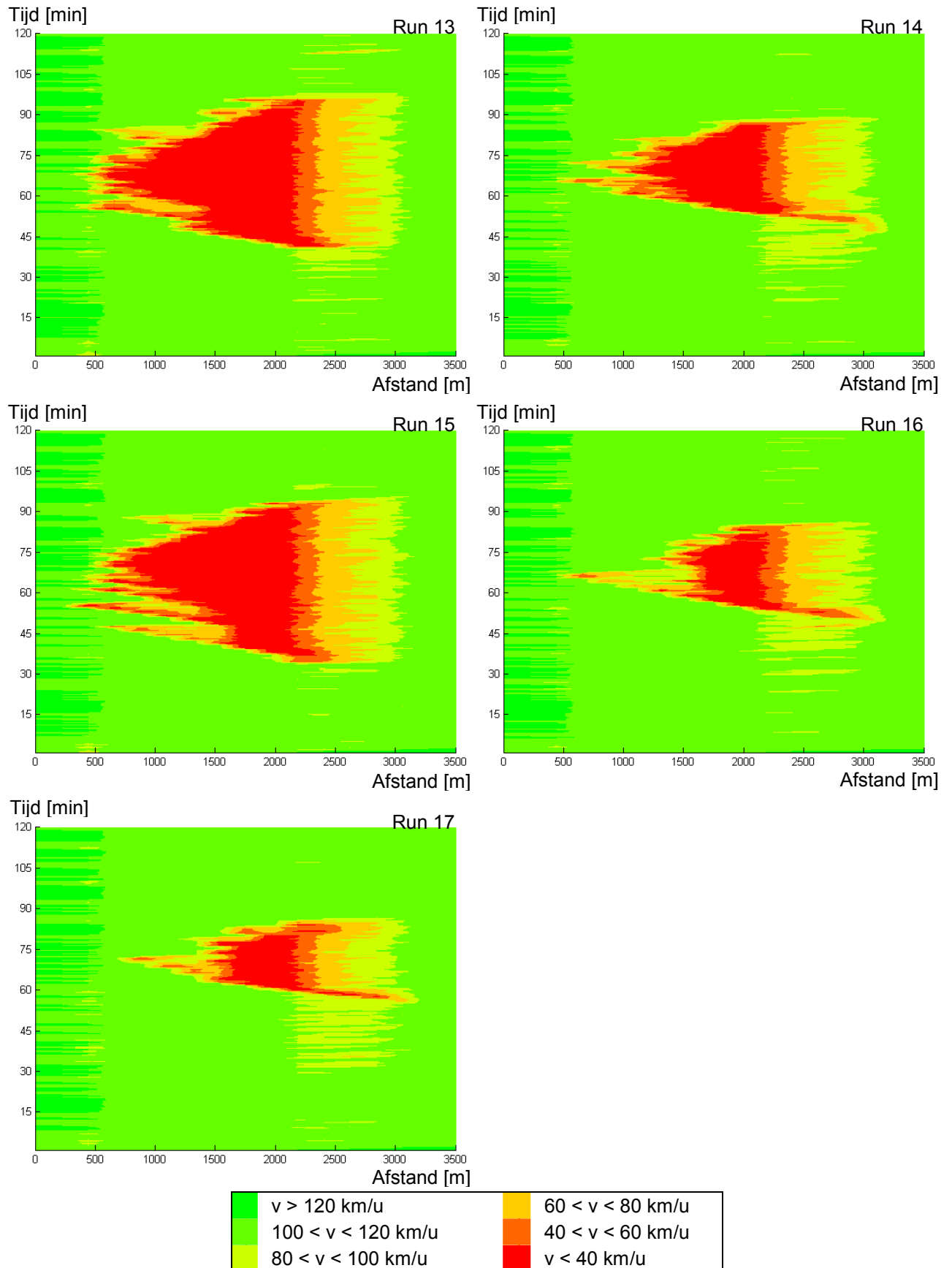
Tabel 7: Overzicht van de bepaling van het aantal simulatieruns.

<b>Rijstrook</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1 / 2</b>	<b>1 / 2 / 3</b>
<b>Gem. snelheid</b>	8,4	16,9	748,3	9,8	8,7
<b>Intensiteit</b>	4,4	13,9	3545,5	6,4	0,9
<b>Reistijd</b>	7,7	12,5	160,7	9,6	15,4

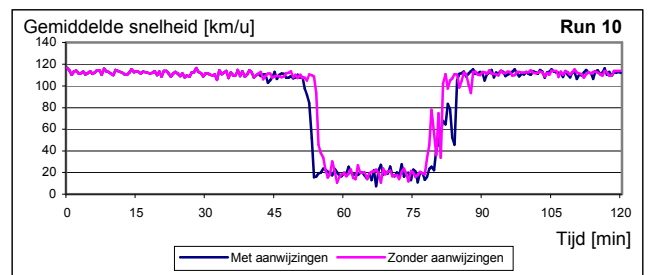
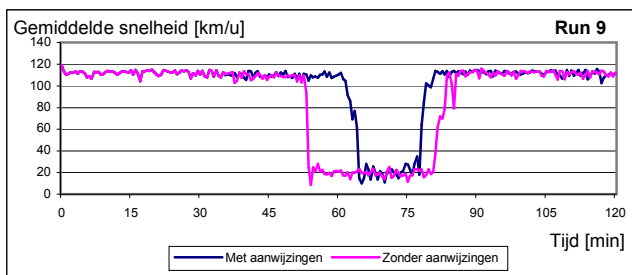
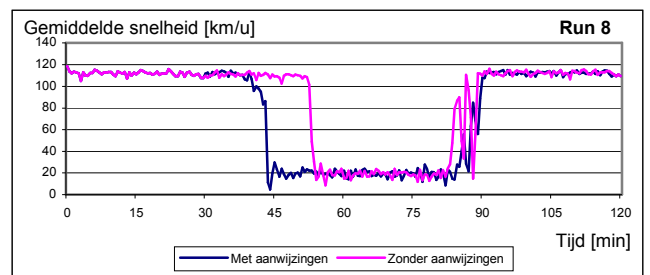
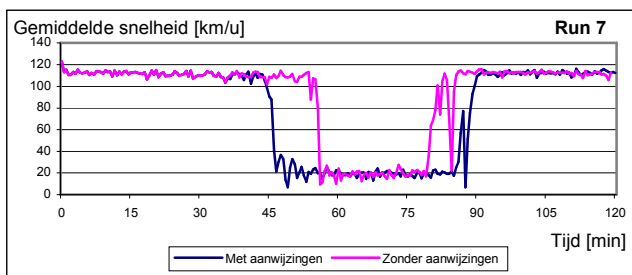
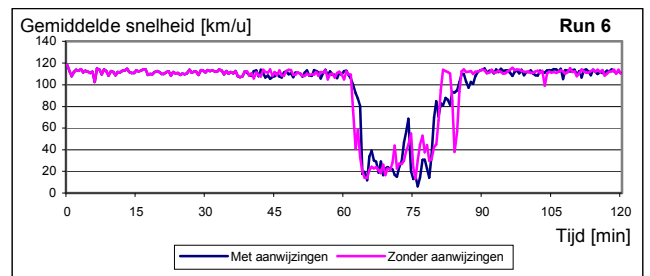
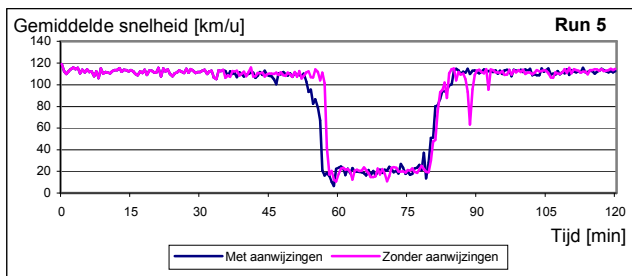
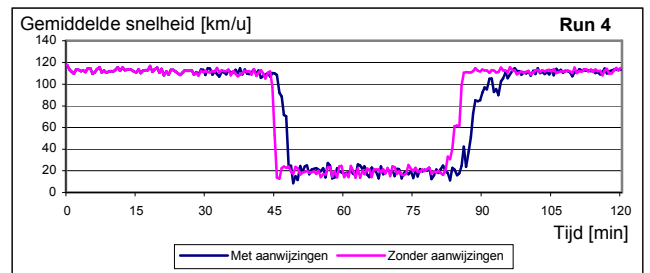
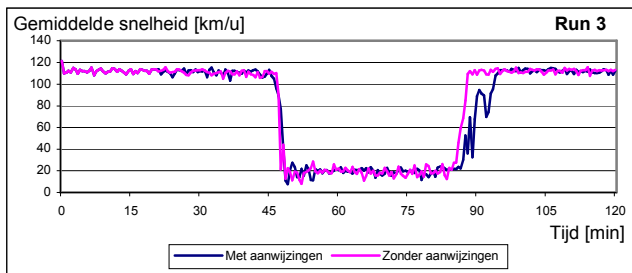
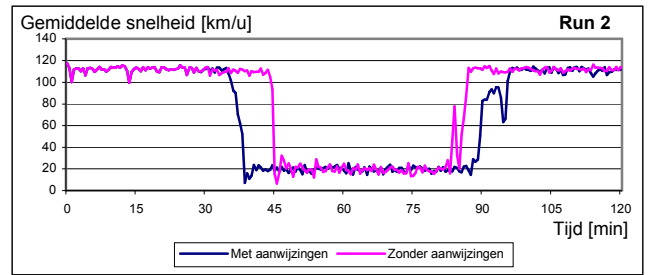
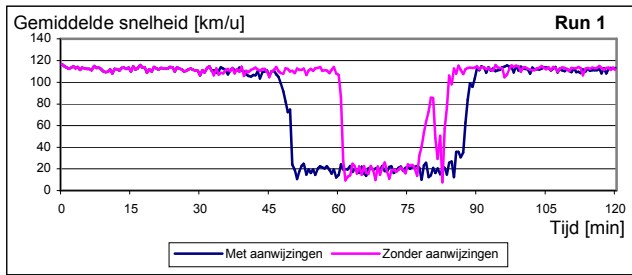
### Bijlage 4: Snelheidscontourplot referentie per simulatierun

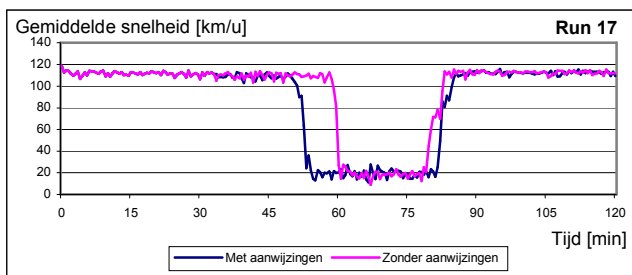
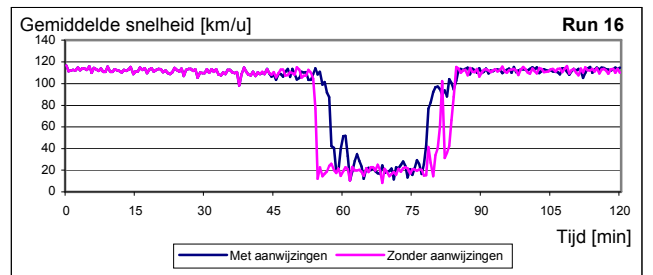
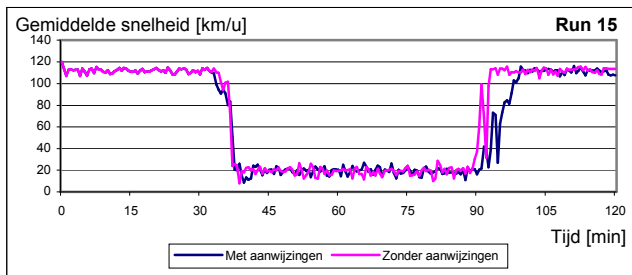
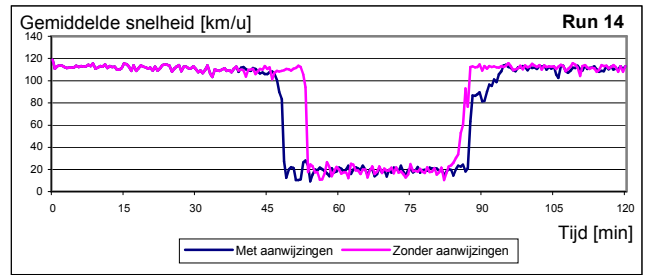
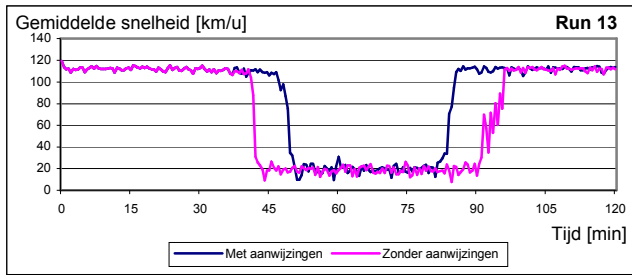
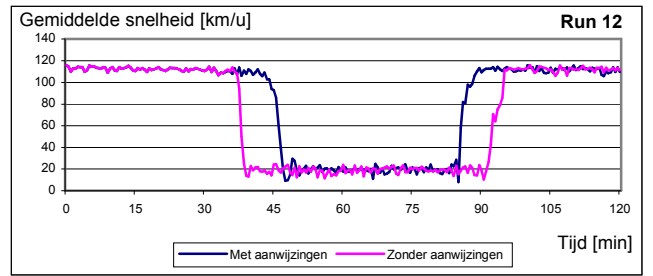
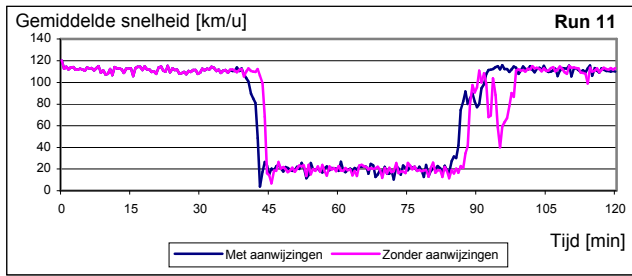






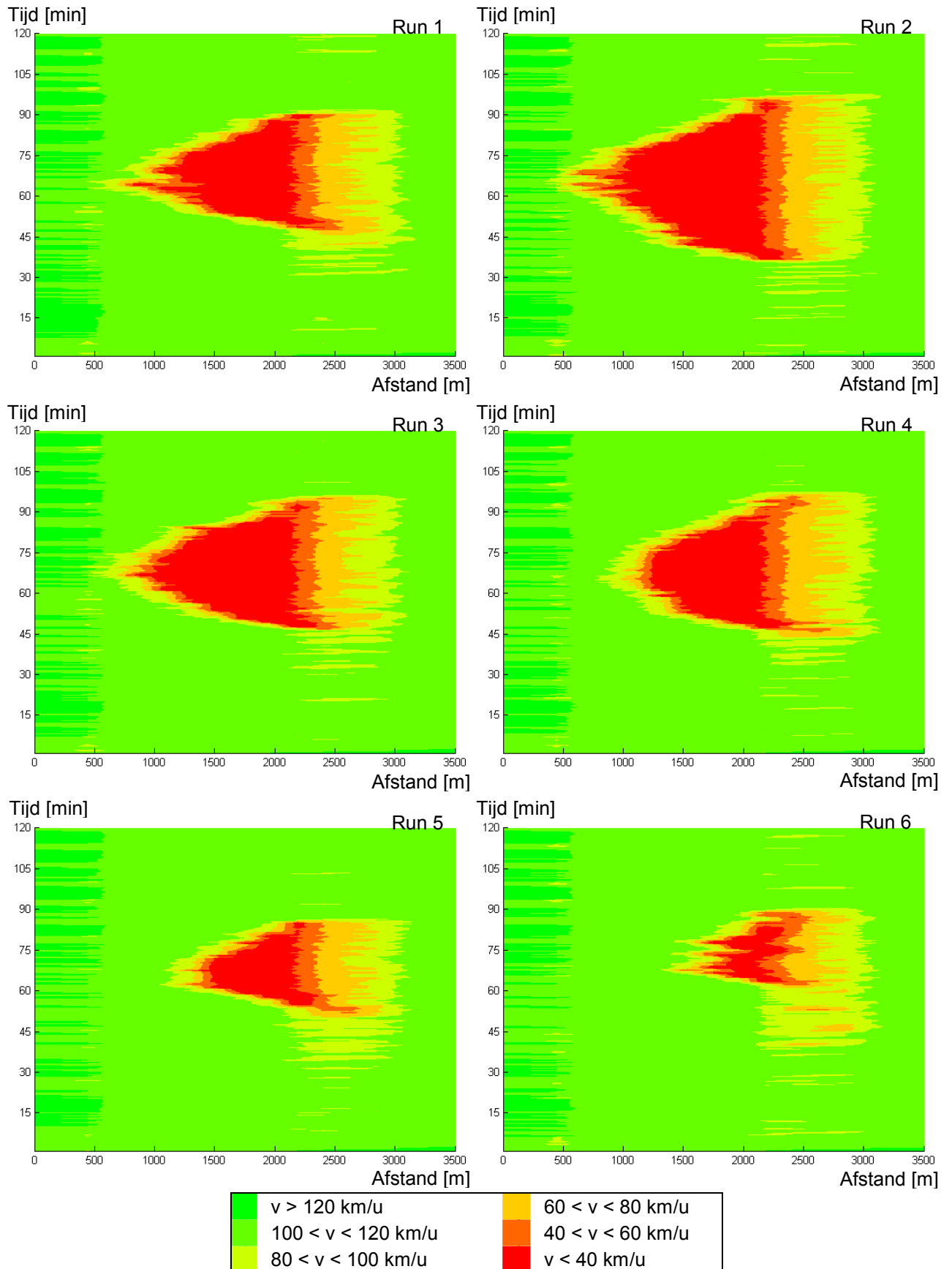
### Bijlage 5: Snelheidsverloop scenario 1 per simulatierun

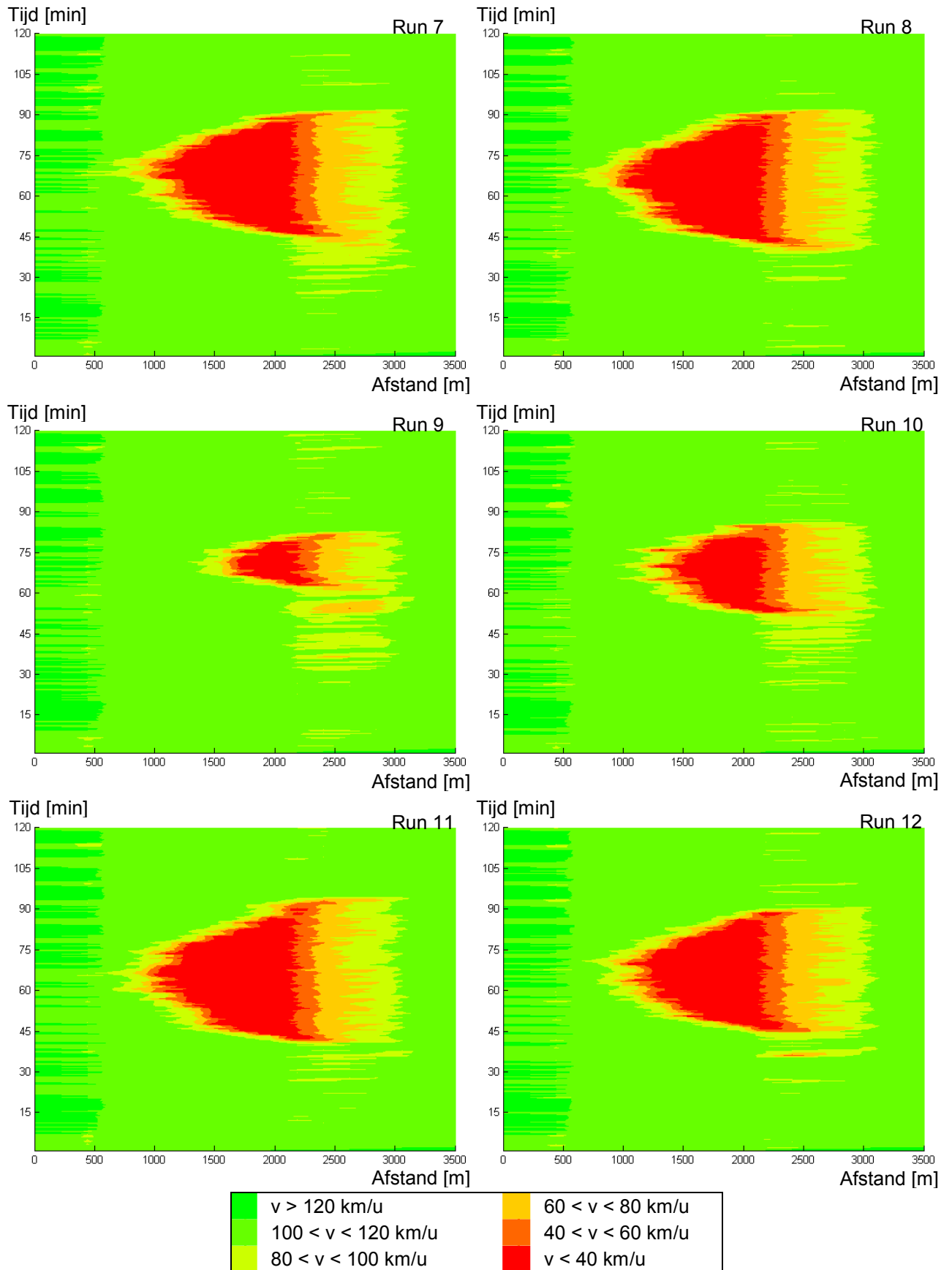


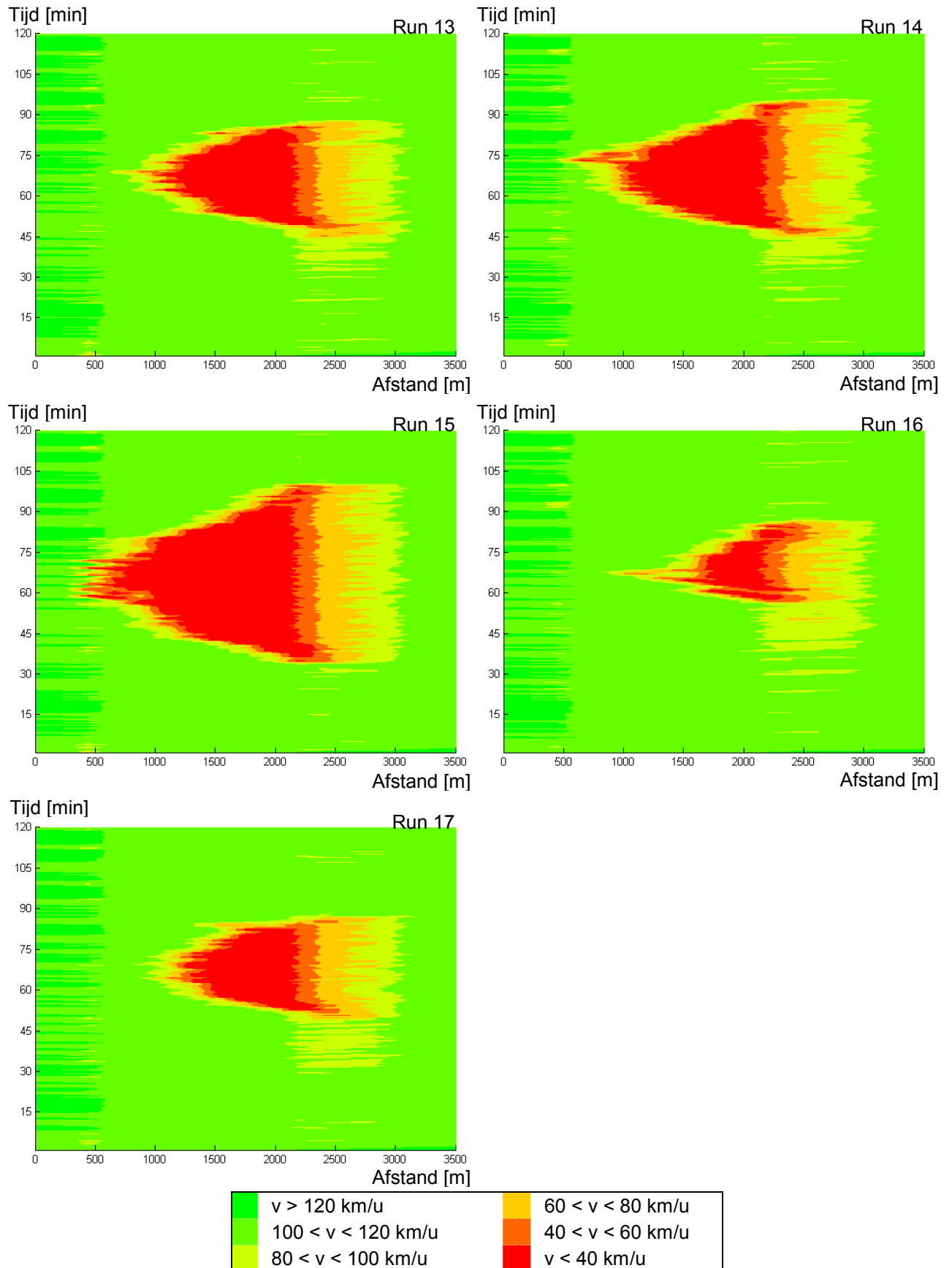




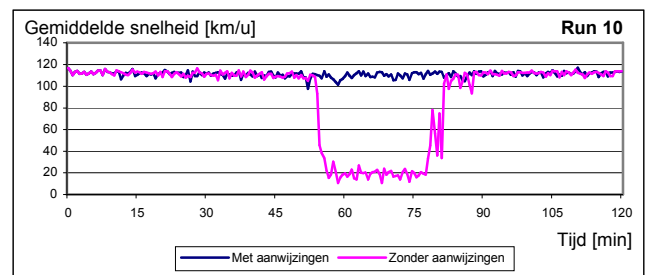
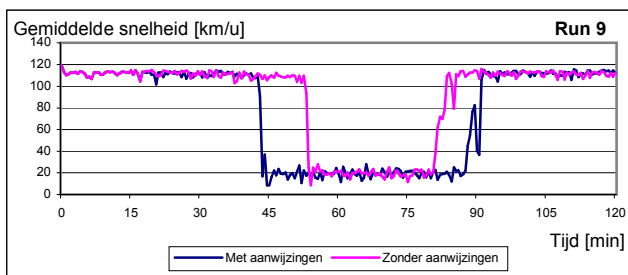
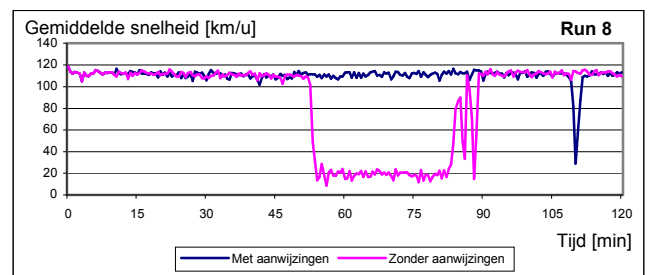
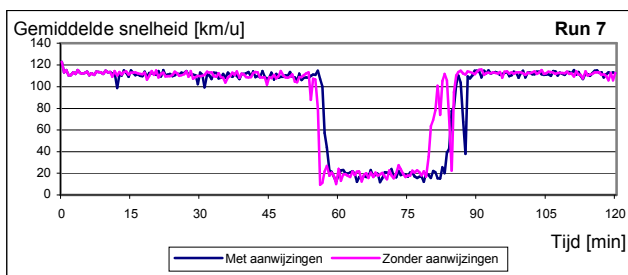
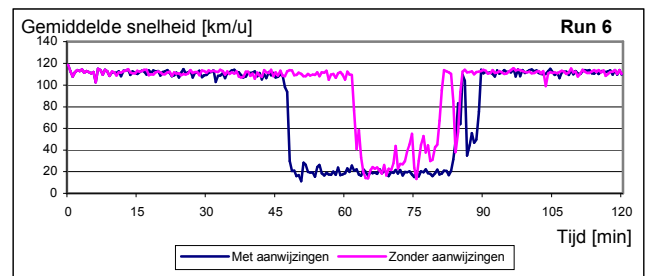
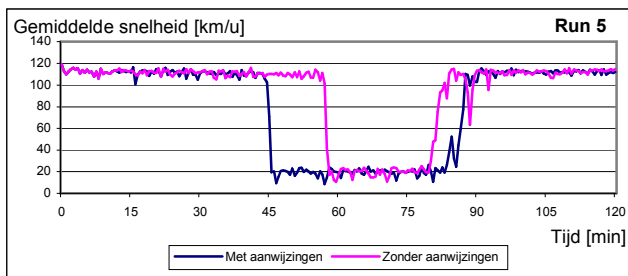
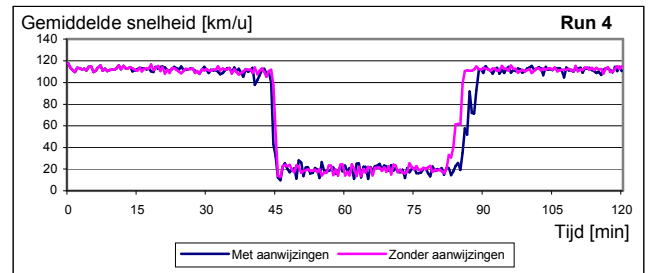
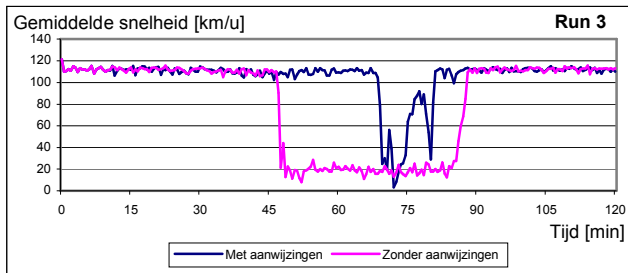
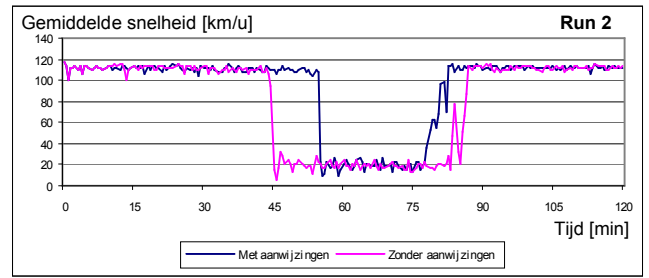
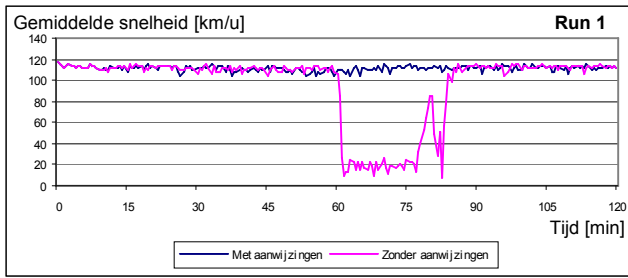
### Bijlage 6: Snelheidscontourplot scenario 1 per simulatierun

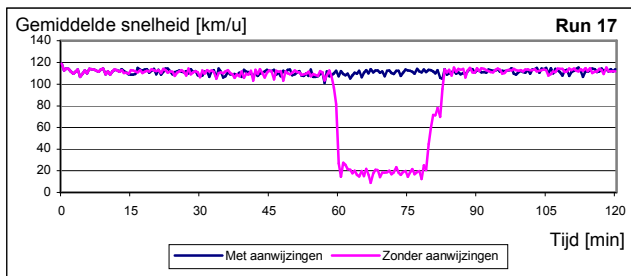
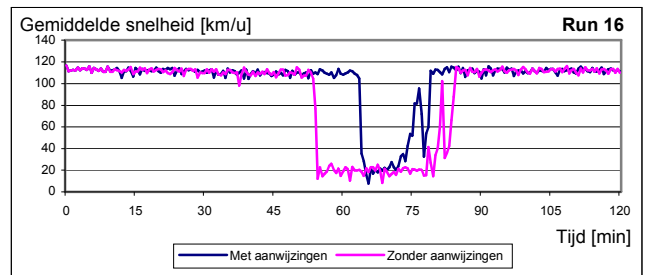
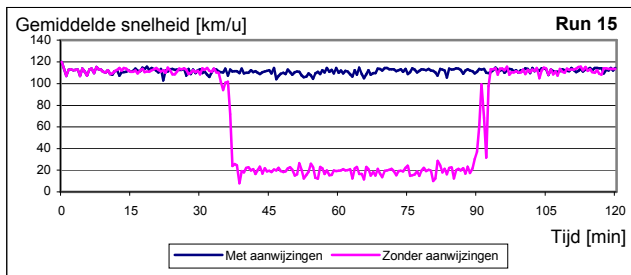
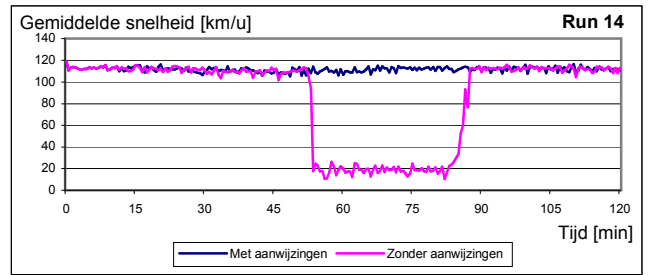
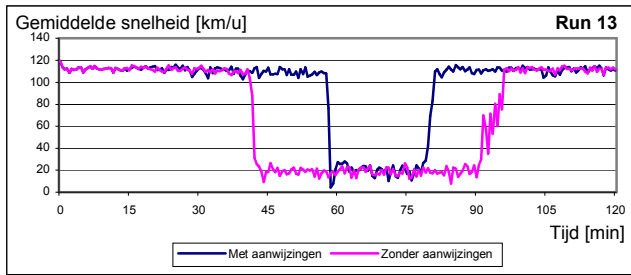
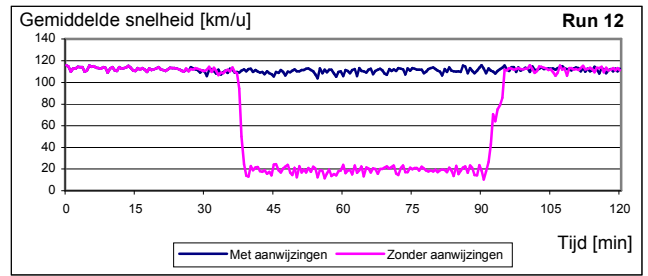
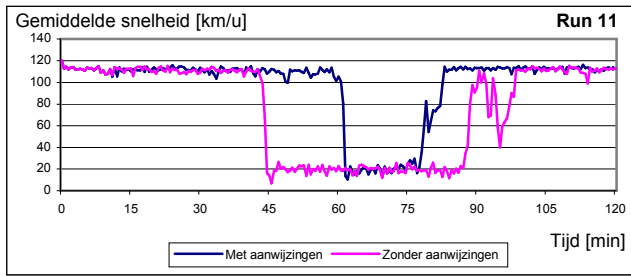






## Bijlage 7: Snelheidsverloop scenario 2 per simulatierun





### Bijlage 8: Snelheidscontourplot scenario 2 per simulatierun

