

Het verkeerskundig
laboratorium
voor studenten

ITS EDU LAB

Dynamische Maximumsnelheden: Uitbreiding en Toepassing

Ilse Schelling

Augustus 2010



Rijkswaterstaat

TU Delft

Dynamische Maximumsnelheden: Uitbreiding en Toepassing

Ilse Schelling

Augustus 2010

**MSc Thesis Civil Engineering
Delft University of Technology**

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstudeeronderzoek voor de master Transport en Planning aan de TU Delft. Ik heb dit mogen doen in het "ITS Edulab", een samenwerkingsverband tussen de TU Delft en de Dienst Verkeer en Scheepvaart van Rijkswaterstaat. De aanleiding van dit onderzoek waren de proeven met dynamische maximumsnelheden in Nederland. Ik heb gekeken naar welke factoren het effect van dynamische maximumsnelheden beïnvloeden en aan de hand daarvan een methode ontwikkeld voor de bredere toepassing van dynamische maximumsnelheden. Verder heb ik met veel plezier gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuwe regeling waarbij dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering.

Graag wil ik Serge Hoogendoorn, Paul Wiggenraad, John Baggen, Ydo de Vries, Marco Schreuder en in het bijzonder Andreas Hegyi bedanken voor hun kritische blik, adviezen, en enthousiasme. Ik heb met veel plezier met jullie samengewerkt.

Verder wil ik graag mijn collega's bij het Edulab, het projectteam van Dynamax en de afdeling Verkeermanagement Hoofdwegennet bedanken voor de gezelligheid en adviezen.

Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor de steun tijdens mijn studie en Thomas, voor zijn steun tijdens mijn afstudeeronderzoek en het aanhoren van mijn afstudeerproblemen, waar ik toch altijd wel weer uitkwam.

Delft, 10 augustus 2010

Samenvatting

Door de toename van de mobiliteit wordt het steeds drukker op de Nederlandse autosnelwegen. Het is echter onmogelijk, en ook onverantwoord om de wegcapaciteit grenzeloos uit te breiden. De doelstelling van de wegbeheerders is dan ook om de bestaande wegcapaciteit beter te benutten, oftewel efficiënter gebruik te maken van het Nederlandse wegennet. Een voorbeeld van een benuttingsmaatregel is de toepassing van dynamische maximumsnelheden, waarmee de snelheidslimiet kan worden afgestemd op onverwachte en wisselende situaties zoals weer, drukte of een ongeval. Hiermee kan de doorstroming worden verbeterd, de verkeersveiligheid worden vergroot en de milieubelasting worden beperkt.

Om een uitspraak te kunnen doen over de bredere toepassing van dynamische maximumsnelheden is in de literatuurstudie gekeken onder welke omstandigheden dynamische maximumsnelheden een positief effect op de doorstroming kunnen hebben, waarbij het aantal voertuigverliesuren zoveel mogelijk wordt beperkt. Hieruit blijkt dat vooral de regelfilosofie bepalend is voor het effect op de doorstroming. De eerste regelfilosofie is gericht op het beperken van de instroom door tijdelijk de snelheid te verlagen, waarmee filegolven kunnen worden opgelost. Als dynamische snelheden gecombineerd worden met toeritdosering kan de instroom nog meer worden beperkt en kunnen filegolven rondom toeritten beter opgelost worden.

Een tweede regelfilosofie verhoogt juist de snelheid in de randen van de spits van 80 km/u naar 100 km/u, waarmee het ontstaan van congestie kan worden uitgesteld. Deze regelfilosofie is vooral toepasbaar in 80 km-zones waarbij weefbewegingen moeilijker verlopen door homogeen rijgedrag.

Een andere mogelijke regelfilosofie is gericht op homogeniseren en maakt gebruik van snelheden rond de kritische snelheid. Hiermee kan de doorstroming echter niet verbeterd worden.

Aan de hand van deze kennis is een regeling ontwikkeld waarbij dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering. Deze vernieuwde regeling kan er voor zorgen dat er meer filegolven op te lossen zijn en dat filegolven sneller opgelost kunnen worden.

Ook is er een methode ontwikkeld waarmee locaties kunnen worden geselecteerd die geschikt zijn voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden waarbij de doorstroming zoveel mogelijk wordt verbeterd.

De methode bestaat uit grofweg drie onderdelen; vaststellen van het type file, de locatieselectie en de maatregelspecificatie. Mogelijke typen files zijn filegolven, staande files bij toeritten of doorstromingsproblemen in 80 km-zones zijn. Afhankelijk van het type file worden locaties op een andere manier geselecteerd.

In een globale selectie worden trajecten met filegolven geselecteerd op basis van i/c verhouding. Staande files kunnen geselecteerd worden op basis van de filelengte bij de toeritten. 80 km-zones kunnen geselecteerd worden op basis van doorstromingsproblemen die veroorzaakt worden door een bottleneck binnen de 80 km-zone. Vervolgens kan er in meer detail naar de trajecten gekeken worden. Hiervoor moet eerst lusdata voor een representatief aantal dagen in Monigraph verwerkt worden. Op basis van deze data kunnen de verschillende typen files worden geïdentificeerd. Bij staande files en filegolven kan op basis van schokgolftheorie bepaald worden of door het beperken van de instroom de files oplosbaar zijn met dynamische maximumsnelheden en toeritdosering. Onderzoek naar het verschil in capaciteitsval tussen staande files en filegolven moet duidelijk maken wanneer staande files oplosbaar zijn met dynamische maximumsnelheden.

Voor het bepalen van de mogelijke uitstel van files in 80 km-zones kan gebruik gemaakt worden van de resultaten van de proef op de A12 bij Voorburg en historische data.

Uit de detailanalyse en de oplosbaarheid volgt de mogelijke winst in voertuigverliesuren. Op basis daarvan kunnen de trajecten worden gerangschikt.

In de maatregelspecificatie wordt beschreven hoe een geschikte benadering voor een traject gekozen kan worden en hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden. Hierbij kan gedacht worden aan de lengte van het traject, het soort algoritme en de toepassing van toeritdosering.

Aangezien de meeste benaderingen met dynamische maximumsnelheden gericht zijn op het oplossen van filegolven, is de methode alleen voor dit type file getest in een casestudy. Eerst is er een globale selectie gemaakt van locaties. Van tien willekeurige trajecten uit de selectie is data verwerkt in Monigraph. Op acht trajecten traden daadwerkelijk filegolven op. Om een beter beeld te krijgen van de trajecten die geselecteerd zijn, zal echter van meer trajecten data in Monigraph verwerkt moeten worden.

Vervolgens is er in meer detail gekeken naar de A2 tussen Holendrecht en Oudenrijn en de A15 tussen Hendrik Ido Ambacht en Gorinchem. Het aantal filegolven ligt op de A2 hoger dan op de A15 en na het bepalen van de oplosbaarheid van filegolven bij toepassing van dynamische maximumsnelheden in combinatie met toeritdosering blijkt dat op de A2 ook meer winst in voertuigverliesuren valt te behalen. De procentuele winst ligt op de A15 echter hoger, door de lagere frequentie van filegolven.

Het effect van toeritdosering is echter beperkt. Dit heeft vooral te maken met de lage intensiteiten op sommige toeritten en de aanwezigheid van staande files rondom toeritten, waardoor de filegolven als niet oplosbaar worden beschouwd. Deze staande files kunnen mogelijk ook met dynamische maximumsnelheden en toeritdosering worden opgelost.

Voor de verbetering van de ontwikkelde regeling met toeritdosering wordt aanbevolen om ook rekening te houden met de aanwezigheid

van afritten en andere toeritten die verder stroomopwaarts liggen. Hierdoor komt het regelschema beter overeen met de werkelijkheid. Hierbij zijn metingen van intensiteiten op de toerit met detectielussen noodzakelijk als de regeling in de praktijk wordt toegepast. De volgende stap is het uitvoeren van een simulatiestudie en een praktijktest met de gekozen benadering om zo het effect op de doorstroming beter te kunnen bepalen.

Summary

The Dutch motorways are becoming more and more congested due to the increasing mobility. It is however not possible to keep expanding the road capacity. The ambition of the national road network authority is to achieve more flexibility and increased performance of the existing road network. A possible way to do this is by applying dynamic speed limits. In this way, speed limits can be adjusted to unexpected situations such as weather conditions, congestion or incidents. The use of dynamic speed limits can improve traffic flow, traffic safety and the environmental impact.

To allow one to make a statement about the broader application of dynamic speed limits a study of literature has been conducted. This reveals in which circumstances dynamic speed limits can have a positive effect on traffic flow and in which circumstances the total time spent is minimized. It showed that the control approach is most important for a positive effect on traffic flow.

The first control approach is focused on preventing traffic breakdown or resolving existing jams by reducing the flow by means of speed limits. When dynamic speed limits are combined with ramp metering, traffic inflow can be reduced further and traffic jams around on-ramps can better be resolved.

In the second control approach the speed limit is increased just before the peak hour from 80 km/h to 100 km/h. In this way congestion can be postponed. This control approach is especially useful in 80 km/h-zones where merging is difficult because of homogeneous traffic.

Another possible control approach is focused on homogenization and uses speed limits near the critical speed. However, this approach is not suitable to improve traffic flow.

Using this knowledge, a new control approach has been developed in which dynamic speed limits are combined with ramp-metering. This control approach can help to solve more jams compared to a control approach with dynamic speed limits.

Also, a method has been developed to select locations which are suitable for the implementation of dynamic speed limits to improve traffic flow. The method consists of three parts; determination of the type of jam, selection of locations and determination of the approach. Possible type of jams could be wide moving jams, bottlenecks near on-ramps or congestion in 80 km/h-zones. It depends on the type of jam in which way locations are selected.

To select suitable locations, a global selection is made first. Locations with wide moving jams can be selected based on the flow-capacity ratio. Selection of locations with bottlenecks near on-ramps can be based on the length of the jam. 80 km/h-areas can be selected based on traffic flow problems caused by a bottleneck in this area.

After that, one can look at the locations in greater detail.

First, data from detection loops must be processed. Based on this data, the different types of jams can be identified. Using shockwave theory

one can determine whether reducing the inflow by applying dynamic speed limits and ramp-metering can solve wide moving jams or jams near on-ramps. However more research, into the difference in capacity drop between wide moving jams and jams at on-ramps, is needed to determine under which circumstances jams at on-ramps are solvable. To determine the possible postponement of congestion in 80 km/h-zones, the results of the practical test on the A12 near Voorburg and historic data can be used.

The analyses and solvability-test leads to a possible gain in total time losses. Based on this, one can make a classification of the different locations.

After this procedure it is described how one can choose a suitable approach for the location and how the approach can be specified. Hereby, one can think of the length of the stretches of road, the type of algorithm and the application of ramp-metering.

Because most of the approaches are focused on solving wide moving jams, the method is tested in a case study for this type of jams. First, a global selection of locations is made. After data processing of a ten random stretches in Monigraph it appears that on eight out of ten stretches wide moving jams occur. To get a better view of the selection, it is necessary to process more data of stretches in Monigraph.

The stretches on the A2 between Holendrecht and Oudenrijn and the A15 between Hendrik Ido Ambacht and Gorinchem are considered in greater detail. The frequency of wide moving jams is higher on the A2. After determining the solvability of wide moving jams, by using dynamic speed limits and ramp metering, the total time loss reduction is greatest on the A2. In percentage terms the gain on the A15 is higher, because of the lower frequency of traffic jams.

Due to the very low flow rates at some on-ramps and the presence of other jams near on-ramps, the effect of ramp-metering was very limited. It is possible that these jams can also be solved by using dynamic speed limits and ramp-metering.

To improve the developed control approach with dynamic speed limits and ramp-metering it is recommended to take into account every on-ramp and off-ramp upstream of the wide moving jam. In this way the control schedule is more realistic and more jams can be solved.

When the control approach is used in practice, it is recommended to measure the flow rates with detection loops at on-ramps.

The next step is to use a simulation model and a practical test with the application of dynamic speed limits to be able to predict the effects of dynamic speed limits.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	II
SAMENVATTING	III
SUMMARY.....	VI
INHOUDSOPGAVE	VIII
1. INLEIDING	1
1.1 PROBLEEMOMSCHRIJVING	1
1.2 BETER BENUTTEN VAN DE BESTAANDE WEGCAPACITEIT	2
1.3 ACHTERGROND DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN	2
1.4 EXPERIMENTEN MET DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN	3
1.5 DOELSTELLING	4
1.6 LEESWIJZER	5
2. LITERATUURSTUDIE.....	7
2.1 INLEIDING	7
2.2 THEORETISCHE ACHTERGROND	9
2.2.1 <i>Algemeen</i>	9
2.2.2 <i>Verkeersstroomtheorie</i>	11
2.3 HUIDIGE SITUATIE	13
2.3.1 <i>Automatische Incident Detectie</i>	13
2.3.2 <i>Effecten van Automatische Incident Detectie</i>	14
2.4 MOGELIJKE REGELFILOSOFIEËN MET DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN	15
2.5 VERSCHILLENDE BENADERINGEN VAN DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN	18
2.5.1 <i>Benaderingen met dynamische maximumsnelheden</i>	19
2.5.2 <i>Benaderingen met dynamische maximumsnelheden en toeritdosering</i>	19
2.6 BEOORDELING BENADERINGEN	20
2.7 CONCLUSIE	22
3. UITBREIDING DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN	25
3.1 INLEIDING	25
3.2 REGELING MET DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN	25
3.3 INVLOED VAN TOERITTEN OP HET REGELSHEMA	27
3.4 UITBREIDING MET TOERITDOSERING	29
4. METHODEONTWIKKELING	33
4.1 INLEIDING	33
4.2 PROBLEEMOMSCHRIJVING	34
4.2.1 <i>Kenmerken filegolven</i>	35

4.2.2	<i>Kenmerken staande files bij toeritten</i>	36
4.2.3	<i>Kenmerken doorstromingsproblemen 80 km-zones</i>	36
4.3	LOCATIESELECTIE.....	38
4.3.1	<i>Globale selectie van locaties</i>	38
4.3.2	<i>Detailanalyse van geselecteerde locaties</i>	42
4.3.3	<i>Beoordeling oplosbaarheid of mogelijke uitstel van files</i>	45
4.3.4	<i>Rangschikking van locaties</i>	48
4.4	MAATREGELSPECIFICATIE.....	49
4.4.1	<i>Keuze benadering</i>	49
4.4.2	<i>Uitwerking</i>	50
4.5	CONCLUSIE.....	51
5.	CASE STUDY	55
5.1	INLEIDING.....	55
5.2	LOCATIESELECTIE.....	55
5.2.1	<i>Globale selectie van locaties met filegolven</i>	55
5.2.2	<i>Detailanalyse van geselecteerde locaties met filegolven</i>	56
5.2.3	<i>Bepalen oplosbaarheid van de filegolven</i>	64
5.3	MAATREGELSPECIFICATIE.....	68
6.	EVALUATIE METHODE	71
6.1	INLEIDING.....	71
6.2	LOCATIESELECTIE.....	71
6.2.1	<i>Globale selectie van locaties met filegolven</i>	71
6.2.2	<i>Detailanalyse van locaties met filegolven</i>	71
6.2.3	<i>Bepalen van de oplosbaarheid van filegolven</i>	72
6.2.4	<i>Rangschikking</i>	73
6.3	MAATREGELSPECIFICATIE.....	73
7.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	75
7.1	CONCLUSIES.....	75
7.2	AANBEVELINGEN.....	78
	REFERENTIES	81
	BIJLAGE I: BENADERINGEN MET DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN EN TOERITDOSERING	85
	BIJLAGE II: BENADERINGEN MET DYNAMISCHE MAXIMUMSNELHEDEN EN TOERITDOSERING	95
	BIJLAGE III: UITWERKING REGELSCHEMA MET TOERITDOSERING	99
	BIJLAGE IV: GLOBALE SELECTIE VAN TRAJECTEN MET FILEGOLVEN	105
	BIJLAGE V: CONTOURPLOTS VAN TRAJECTEN UIT GLOBALE SELECTIE	107

1. Inleiding

1.1 Probleemomschrijving

Door de toename van de mobiliteit wordt het steeds drukker op de Nederlandse autosnelwegen. Het gevolg hiervan is dat er files ontstaan. Het aantal voertuigverliesuren is in de periode 2000-2006 sterk gestegen. De gemiddelde stijging van het aantal voertuigverliesuren in files op het hoofdwegennet was tussen 2004 en 2006 circa 9% per jaar. De totaal opgelopen vertraging in files op het wegennet bedroeg in 2006 bij benadering 44 miljoen voertuigverliesuren. Als ook vertraagde afwikkeling (snelheden tussen 50 en 100 km/u) wordt meegerekend, dan bedraagt het totale aantal voertuigverliesuren 62,7 miljoen.

De gemiddelde betrouwbaarheid van de reistijd op het hoofdwegennet is in de periode 2002-2006 ook gedaald: van 94% naar 91%.

Het grootste deel van deze toename (67%) is veroorzaakt door intensiever gebruik van de weg, onder andere door groei van de bevolking, de werkgelegenheid en de welvaart. Doordat het aanbod de groei van de vraag niet volgt, staan er steeds meer en langere files. Bovendien duren de spitsperioden langer en valt het begin van de spits steeds vroeger.

Files zorgen voor een lagere capaciteit tijdens de spits, waardoor er vertragingen ontstaan, de milieuvervuiling toeneemt en de verkeersveiligheid afneemt. Filevorming beïnvloedt de gemiddelde snelwegcapaciteit en doorstroming door twee onafhankelijke effecten: de capaciteitsval (de capaciteit ligt bij vrije doorstroming hoger dan bij congestie) in de kop van de file en de blokkering van afritten door de terugslag van de file. Beide effecten zorgen voor een toename van de degradatie van de infrastructuur. Als de congestie zich al over een groot gedeelte van het snelwegennetwerk heeft verspreid, is de verkeersvraag vaak veel kleiner dan de gemiddelde capaciteit van de infrastructuur, maar door de degradatie van de infrastructuur kan de snelweg de vraag niet aan. De congestie blijft dan ook voortduren totdat de verkeersvraag voldoende afgenomen is (ver onder de gemiddelde capaciteit) aan het einde van de spits. De gevolgen van de degradatie van infrastructuur zijn nog groter bij ringwegen.

Files kunnen onderverdeeld worden in structurele en incidentele files. Met structureel wordt bedoeld dat ze regelmatig terugkomen op dezelfde wegen en dezelfde tijden omdat de verkeersvraag groter is dan de beschikbare wegcapaciteit. Incidentele files zijn het gevolg van bijvoorbeeld ongevallen, wegwerkzaamheden of grote evenementen. Deze kunnen voorspelbaar zijn (bijvoorbeeld bij wegwerkzaamheden en geplande evenementen), maar ook onvoorspelbaar (bij ongevallen). Bij een hoge belasting van het wegennetwerk kan een kleine verstoring al

de oorzaak zijn voor filevorming (bijvoorbeeld een automobilist die iets te hard remt). Deze verstoringen werken snel door naar andere delen van het wegennet.

De verhouding tussen het aantal structurele en incidentele files op het hoofdwegennet wordt in meerdere onderzoeken van AVV¹ en TNO² geschat op 70%-30%. Juist deze incidentele files, en vooral de onvoorspelbare, zorgen voor veel ongemak bij de weggebruiker.

1.2 Beter benutten van de bestaande wegcapaciteit

Een eenvoudige manier om de congestie 'op te lossen' lijkt het aanleggen van extra wegen om zo voldoende capaciteit te creëren. Het is echter naast onmogelijk ook onverantwoord om de wegcapaciteit grenzeloos uit te breiden. De doelstelling van de wegbeheerders is dan ook om de bestaande wegcapaciteit beter te benutten, oftewel efficiënter gebruik te maken van het wegennet. In het Beleidskader Benutten is benutten gedefinieerd als het zo goed mogelijk afwickelen van een (gegeven) verkeersvraag over een (gegeven) weginfrastructuur aanbod, door:

1. Het optimaliseren van de wegcapaciteit in relatie tot de actuele verkeersvraag;
2. Het optimaliseren van de afwikkeling van het verkeer (longitudinaal, lateraal en op kruisvlakken);
3. Het spreiden van de verkeersvraag over het netwerk en over de dag door (potentiële) weggebruikers te informeren;
4. Het geleiden en sturen van verkeer, vooral in bijzondere situaties.

Een voorbeeld van een benuttingsmaatregel is de toepassing van dynamische maximumsnelheden, waarmee de snelheidslimiet kan worden afgestemd op onverwachte en wisselende situaties zoals weer, drukte of een ongeval. Een meer flexibelere benadering van de maximumsnelheden past in de ambitie uit het Beleidskader Benutten, omdat ze snel effectief in kunnen worden gezet.

1.3 Achtergrond dynamische maximumsnelheden

Het Nederlandse autosnelwegennet kent een stelsel van in principe vaste snelheidslimieten. Op een groot deel van het wegennet geldt een limiet van 120 km/u. Op relatief onveilige wegen en op drukke wegen nabij stedelijke gebieden geldt om milieuredenen een limiet van 100 km/u. Een snelheidslimiet van 80 km/u geldt als uitzondering op daarvoor in aanmerking komende probleemlocaties (m.n. luchtkwaliteit). Deze limieten houden geen rekening met de actuele verkeersomstandigheden: de weggebruiker dient naar eigen inzicht zelf zijn snelheid aan te passen aan de verkeerssituatie, met inachtneming van de maximumsnelheid.

Dynamiseren van de maximumsnelheden maakt het mogelijk om de snelheidslimiet af te stemmen op actuele verkeer-, weg- en omgeving

¹ Adviesdienst Verkeer en Vervoer

² Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

gerelateerde omstandigheden. Dynamische maximumsnelheden worden nu in beperkte mate toegepast. Op snelwegen die zijn voorzien van verkeerssignalering worden bij filevorming en incidenten, en ook bij slechte weersomstandigheden aangepaste limieten getoond. Ook bij werk in uitvoering wordt de snelheidslimiet tijdelijk aangepast. Veiligheidsdoelstellingen zijn meestal primair een reden voor gebruik van een bij de omstandigheden passende limiet. Ook het verbeteren van de doorstroming en de bereikbaarheid kan een doelstelling zijn. In mindere mate wordt ook het milieu gehanteerd als reden voor een dynamische snelheidsaanpassing. Een bij de omstandigheden passende limiet heeft het voordeel dat het begrip van de weggebruiker voor een snelheidsbeperking wordt vergroot, waardoor er meer draagvlak is om de limiet in acht te nemen. Een bij de omstandigheden passende limiet voorkomt ook onnodige vertraging zoals bij een permanente snelheidsverlaging het geval kan zijn.

1.4 Experimenten met dynamische maximumsnelheden

Om inzicht te krijgen in de effecten van dynamische maximumsnelheden op de veiligheid, de doorstroming, het milieu en het gedrag van weggebruikers, experimenteert Rijkswaterstaat met het project Dynamax (DYNamische MAXimumsnelheden) onder het motto 'sneller rijden als het kan, langzamer als het moet'. Ook moet het de consequenties voor het wegbeheer en netwerkmanagement in beeld brengen. Op de A1 tussen Bussum en Muiderberg is de proef gericht op reistijdverkorting op rustige momenten. Hierbij wordt de maximumsnelheid in rustige uren verhoogd van 100 naar 120 km/u. Dit kan bijdragen aan een beter begrip en draagvlak voor de lagere maximumsnelheid in drukke uren. Op de A58 bij Tilburg wordt de maximumsnelheid verlaagd in relatie tot de luchtkwaliteit. Op de A12 tussen Bodegraven en Woerden wordt bij regenval en filegolven de maximumsnelheid aangepast tussen de 120 en 60 km/u. De maatregel moet zorgen voor een beter aangepast rijgedrag bij slechte weersomstandigheden, waardoor er minder incidenten ontstaan. De snelheidsverlaging in relatie tot het verbeteren van de doorstroming moet filegolven oplossen. In december 2009 is er een proef gestart op de A12 bij Voorburg en in het najaar start er een proef op de noordbaan van de A20 bij Rotterdam. Het doel van deze proeven is het verbeteren van de doorstroming en de luchtkwaliteit. Hierbij is het doel om negatieve effecten ten aanzien van de statische 80 km/u maatregel te neutraliseren of zelfs te verbeteren zonder dat dit ten koste gaat van de leefkwaliteit. Tevens kan door het verhogen van de snelheid (van 80 naar 100 km/u) in de nachtelijke uren en in de randen van de spits, de acceptatie van de ingestelde maximumsnelheid vergroten, zonder dat dit ten koste gaat van de leefkwaliteit.

Ook in het buitenland wordt er geëxperimenteerd met dynamische maximumsnelheden. In Duitsland verlaagt men automatisch de maximumsnelheid door middel van corridor management. Dit systeem reageert op verkeersdrukke, slecht weer en incidenten. Dit heeft geleid tot langdurige homogenisering van het verkeer en verminderde reistijd bij hoge verkeersintensiteiten. In Zweden wordt de maximumsnelheid

op de hoofdweg automatisch verlaagd als op de zijweg een voertuig nadert. Deze proef heeft vooral als doel om de veiligheid bij kruispunten te vergroten. In Finland worden aangepaste snelheidslimieten getoond afhankelijk van de weersomstandigheden. Dit heeft geleid tot een afname van de gemiddelde snelheid en de variatie in snelheid bij een slechte wegconditie. Ook is het aantal ongevallen afgenomen. In Londen geldt een dynamische snelheidslimiet op een deel van de M25 om de doorstroming en de betrouwbaarheid van reistijden te verbeteren.

De overeenkomst tussen deze proeven is dat door de maximumsnelheid dynamisch te verlagen of te verhogen getracht wordt afhankelijk van de actuele verkeersomstandigheden de verkeersafwikkeling zo veilig en goed mogelijk te laten verlopen. Elke proef heeft echter een andere filosofie en er wordt een ander algoritme gebruikt voor het vaststellen van de aangepaste maximumsnelheid. De resultaten zullen echter niet alleen afhankelijk zijn de filosofie en het algoritme, maar ook van de omstandigheden op die locatie. Hierbij kan gedacht worden aan het type file, de filezwaarte, de aanwezigheid van handhaving en de weglay-out, zoals het aantal rijstroken en de aanwezigheid van op- en afritten. Het hoeft dus niet zo te zijn dat de toepassing van dynamische maximumsnelheden op een andere locatie even effectief is.

.....
Probleemomschrijving:

Het is onduidelijk in hoeverre de effecten van dynamische maximumsnelheden afhankelijk zijn van de omstandigheden op de locatie waar het toegepast wordt. Er moet daarom onderzoek gedaan worden naar de factoren die het effect van dynamische maximumsnelheden beïnvloeden om een uitspraak te kunnen doen over hoe en waar dynamische maximumsnelheden toegepast kunnen worden en wat de effecten ervan op de doorstroming kunnen zijn.

1.5 Doelstelling

De doelstelling voor dit onderzoek is als volgt gedefinieerd:

.....
Doelstelling:

Het ontwikkelen van een methode voor de selectie van geschikte locaties voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden en waarmee de maatregel zo uitgewerkt wordt dat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt.

Met het verbeteren van de doorstroming wordt bedoeld dat het aantal voertuigverliesuren³ zoveel mogelijk beperkt wordt. Een verbeterde doorstroming mag echter niet ten koste gaan van de verkeersveiligheid of het milieu.

Om deze doelstelling te bereiken zullen de volgende onderzoeksvragen worden beantwoord:

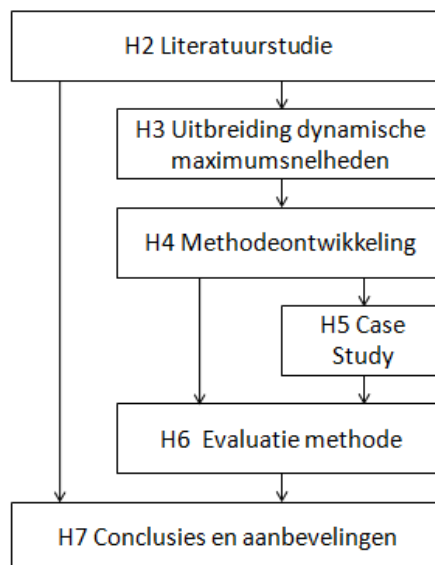
³ Totaal aantal uren reistijdverlies (in vergelijking met ongestoorde afwikkeling) als gevolg van beperking van de wegcapaciteit.

1. Wat zijn de verschillen in de benadering van dynamische maximumsnelheden en wat is het effect op de doorstroming?
2. Onder welke omstandigheden op een locatie kunnen dynamische maximumsnelheden een positief effect hebben op de doorstroming?
3. Welke factoren kunnen van invloed zijn op de impact van dynamische maximumsnelheden?
4. Op basis van welke criteria kunnen geschikte locaties worden geselecteerd voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden?
5. Op welke manier kunnen dynamische maximumsnelheden toegepast worden om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren?
6. Hoe kunnen de effecten van dynamische maximumsnelheden van tevoren voorspeld worden?

1.6 Leeswijzer

In Figuur 1.1 is een schematisch overzicht van dit rapport weergegeven.

.....
 Figuur 1.1: Structuur rapport



In Hoofdstuk 2 zullen verschillende benaderingen van dynamische maximumsnelheden die wel of niet in de praktijk zijn toegepast met elkaar worden vergeleken. Hierdoor wordt duidelijk welke factoren het effect van dynamische maximumsnelheden op de doorstroming beïnvloeden en welke benaderingen geschikt zijn om breder toegepast te worden. De nadruk zal hierbij liggen op de verkeerskundige effecten van dynamische maximumsnelheden.

Hoofdstuk 3 gaat in op een uitbreiding van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering. Met deze regeling kunnen problemen met het oplossen van filegolven rondom toeritten voor komen worden, waardoor de doorstroming nog meer verbeterd wordt.

In Hoofdstuk 4 wordt er een methode beschreven waarmee afhankelijk van het type file geschikte locaties voor het toepassen van dynamische maximumsnelheden kunnen worden geselecteerd. Op basis van een voorspelling van de mogelijke winst die op een locatie te behalen valt kunnen de locaties gerangschikt worden. Vervolgens wordt beschreven hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden op een locatie.

In Hoofdstuk 5 wordt de methode voor de inpassing van dynamische maximumsnelheden in een casestudy getest. Eerst wordt een globale selectie gemaakt van mogelijk locaties met filegolven, waarna er in meer detail naar een selectie van deze locaties gekeken wordt. Vervolgens wordt op basis van de mogelijke winst in voertuigverliesuren een rangschikking van locaties gemaakt en wordt de maatregel verder uitgewerkt.

In Hoofdstuk 6 wordt de methode geëvalueerd en gekeken of deze methode geschikt is om in de praktijk toegepast te worden.

In Hoofdstuk 7 worden er naar aanleiding van dit onderzoek aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek en het gebruik van de methode en de vernieuwde regeling in de praktijk.

2.Literatuurstudie

2.1 Inleiding

Om de doelstelling, zoals omschreven in paragraaf 1.5, te kunnen bereiken is er meer kennis nodig van de mogelijkheden die dynamische maximumsnelheden hebben en welke factoren van invloed zijn op het effect op de doorstroming. Met deze literatuurstudie moet duidelijk worden welke benaderingen van dynamische maximumsnelheden geschikt zijn om de doorstroming te verbeteren.

Om de verschillende benaderingen beter te begrijpen zal in paragraaf 2.2 eerst ingegaan worden op de theoretische achtergrond, waarbij de fundamentele relatie beschreven wordt en ingegaan wordt op de belangrijkste punten uit de verkeersstroomtheorie. In paragraaf 2.3 komt het huidige systeem van dynamische maximumsnelheden (AID) aan bod. Dit systeem zal naast een andere benadering met dynamische maximumsnelheden aanwezig blijven op het wegennet als beveiliging van de filestaart. Ook kan van de effecten en problemen van dit systeem geleerd worden voor het vinden van een geschikte benadering van dynamische maximumsnelheden voor het verbeteren van de doorstroming.

Vervolgens zullen er in paragraaf 2.4 een aantal mogelijke regelfilosofieën beschreven worden die gebruikt kunnen worden bij de toepassing van dynamische maximumsnelheden om de doorstroming te verbeteren.

In paragraaf 2.5 zullen verschillende benaderingen van dynamische maximumsnelheden worden beschreven die tot nu toe in theorie en praktijk zijn gebruikt om de doorstroming te verbeteren.

In paragraaf 2.6 worden de verschillende benaderingen beoordeeld op hun geschiktheid. Als hulpmiddel wordt hierbij gebruik gemaakt van een aantal beoordelingscriteria waaruit moet blijken of een benadering geschikt is om toe te passen op het Nederlandse wegennet. Voor de geschiktheid van een benadering is in eerste instantie een positief effect op de doorstroming vereist. Verder is het soort algoritme belangrijk, het regelniveau (lokaal – netwerk) waarop het algoritme werkt en of er in de benadering rekening gehouden wordt met de mate van naleving van de snelheden. Voor de geschiktheid voor het toepassen op het Nederlandse wegennet moet de locatie die in de benadering wordt gebruikt representatief zijn, mogen de berekeningen niet te complex zijn (in verband met de meetvertraging) en moet het systeem aanwezig zijn naast het AID systeem, waarbij zoveel mogelijk gebruik gemaakt moet worden van de huidige matrixsignaalgevers. Verder is het de bedoeling dat de maatregel altijd inzetbaar is en bijvoorbeeld niet alleen tijdens wegwerkzaamheden. Als hieruit blijkt dat de benadering geschikt is om breder toegepast te worden is het vervolgens belangrijk dat er voldoende informatie over het algoritme beschikbaar is om het te

gebruiken. Verder wordt er voorkeur gegeven aan een benadering die al een keer in de praktijk is getest.

De beoordelingscriteria worden hieronder weergegeven:

1. *Doorstromingsverbetering*: er moet aangetoond zijn dat dynamische maximumsnelheden voor een significante verbetering van de doorstroming zorgen
2. *Doel algoritme*: dit criterium kan opgedeeld worden in de volgende subcriteria:
 - a. Uitstellen/voorkomen van congestie
 - b. Oplossen van congestie.Hierbij wordt de voorkeur gegeven aan een combinatie van a en b.
3. *Regelniveau*: de maatregel moet niet alleen lokaal goede resultaten geven maar ook op netwerkniveau niet voor (extra) vertraging zorgen.
4. *Naleving*: voor de effectiviteit van het algoritme is het belangrijk dat de snelheidslimieten opgevolgd worden. Bij de instelling van snelheden moet rekening gehouden worden met een geringe naleving of er moet door middel van handhaving gezorgd worden voor een strikte naleving.
5. *Eigenschappen locatie*: de weglay-out die gebruikt wordt in de benadering moet representatief zijn voor het Nederlandse wegennet.
6. *Toepasbaarheid*: het systeem moet toepasbaar zijn in het Nederlandse wegennet, de berekeningen mogen niet voor teveel meetvertraging zorgen en het moet naast het AID systeem aanwezig zijn. Ook moet het altijd toepasbaar zijn en bijvoorbeeld niet alleen bij werkzaamheden.
7. *Bruikbaarheid*: voor de methodeontwikkeling moet bijvoorbeeld duidelijk zijn welk algoritme gebruikt is en wat de drempelwaarden zijn.
8. *Praktijkervaring*: voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden wordt de voorkeur gegeven aan een toepassing die al in de praktijk is getoetst. In theoretische modellen is het vaak lastig om mee te nemen hoe de weggebruiker erop reageert.

Deze beoordeling moet leiden tot een beperkt aantal benaderingen die geschikt zijn om toegepast te worden en een positief effect hebben op de doorstroming.

Aan het einde van de literatuurstudie moet het antwoord op de volgende onderzoeksvragen duidelijk zijn:

1. Wat zijn de verschillen in de benadering van dynamische maximumsnelheden en wat is het effect op de doorstroming?
2. Onder welke omstandigheden op een locatie kunnen dynamische maximumsnelheden een positief effect hebben op de doorstroming?
3. Welke factoren kunnen van invloed zijn op de impact van dynamische maximumsnelheden?

2.2 Theoretische achtergrond

Om de verschillende benaderingen die in paragraaf 2.5 besproken worden beter te begrijpen in de werking en effecten ervan zullen eerst de kenmerken van het fundamenteel diagram worden beschreven. Hierdoor wordt duidelijk wat de relatie is tussen de intensiteit, dichtheid en snelheid is. Vervolgens wordt in paragraaf 2.2.2 ingegaan op de verkeersstroomtheorie, waaruit duidelijk moet worden op welk moment de dynamische maximumsnelheden toegepast moeten worden om een positief effect te hebben op de doorstroming en hoe de dynamiek van een file voorspeld kan worden.

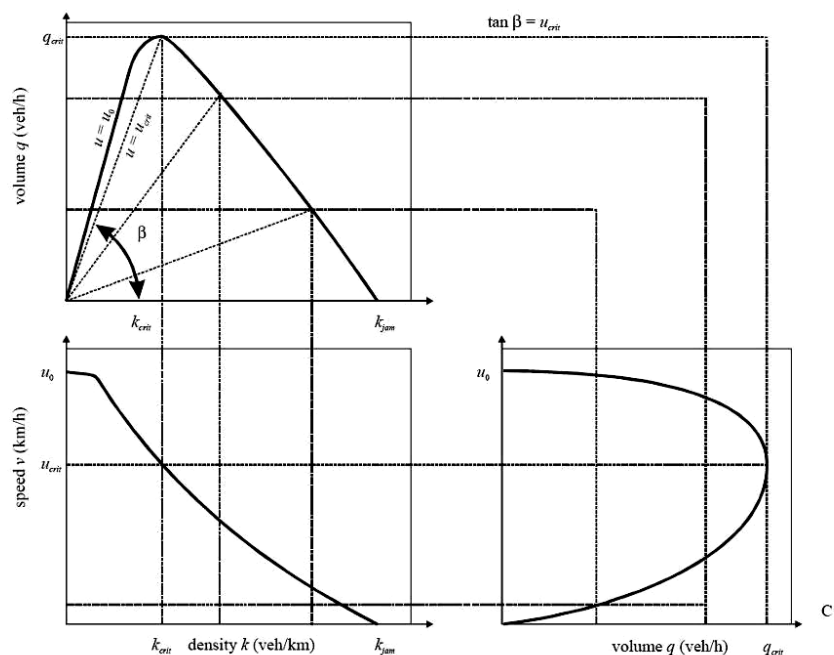
2.2.1 Algemeen

Op macroscopisch niveau kan de verkeersafwikkeling beschreven worden aan de hand van drie grootheden:

- Intensiteit (q): aantal voertuigen per uur;
- Dichtheid (k): aantal voertuigen per km;
- Snelheid (u): km/u.

De relatie tussen deze grootheden wordt beschreven in de fundamentele diagrammen die in Figuur 2.1 zijn weergegeven. Als één fundamenteel diagram bekend is kunnen de andere twee daarvan afgeleid worden aan de hand van de continuïteitsvergelijking $q = k \cdot u$.

Figuur 2.1: Drie onderling samenhangende vormen van het fundamenteel diagram (Hoogendoorn, 2007)



In het diagram zijn vijf parameters aangegeven die bepalend zijn voor het gedrag van het verkeer:

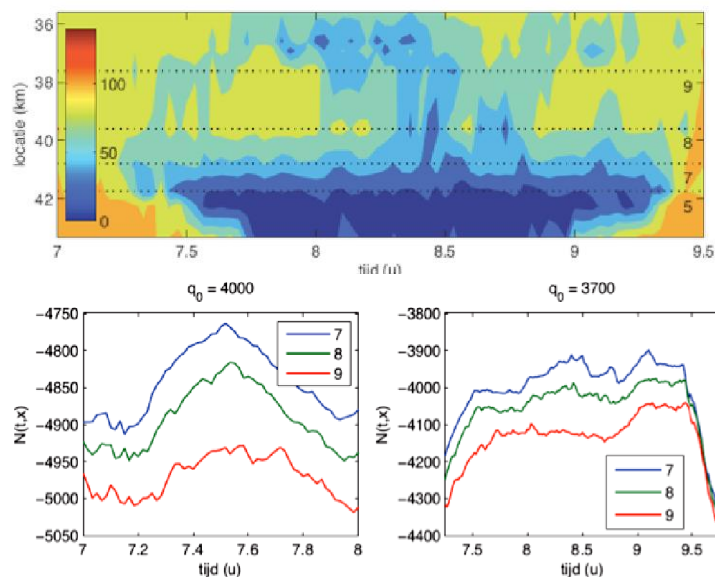
- Maximale intensiteit (q_{crit}), ook wel de capaciteit genoemd;
- Kritische dichtheid (k_{crit}). Dit is de dichtheid bij maximale intensiteit;
- Maximale dichtheid (k_{jam}). Dit is de maximaal mogelijke dichtheid op een weg. Hierbij staat de weg helemaal vol met voertuigen en is de snelheid zeer laag.

- Vrije snelheid (u_0). Dit is de gemiddelde snelheid bij ongehinderde doorstroming. Dit is de richtingscoëfficiënt van het $q(k)$ -diagram in de oorsprong.
- Kritische snelheid (u_{crit}). Dit is de snelheid bij capaciteitsdoorstroming, oftewel de snelheid waarbij de weg het meest efficiënt wordt gebruikt. In het algemeen wordt deze waarde op circa 90 km/u geschat.

In de praktijk blijkt er een capaciteitsval te zijn in de overgang van de vrije doorstroming naar congestie en weer terug naar vrije doorstroming. In Figuur 2.2. wordt er gebruik gemaakt van 'oblique' of 'slanted' curves om deze capaciteitsval te laten zien. De curven worden geschaald met een referentie-intensiteit q_0 . Als de intensiteit in een bepaalde periode gelijk is aan de referentie-intensiteit dan is de curve horizontaal. Zo wordt het makkelijk om perioden met lage en hoge intensiteit waar te nemen.

De linkerfiguur geeft deze curven weer met een referentiewaarde van 4000 vtg/u. Tussen 7:00 en 7:12 is de intensiteit ongeveer 4000 vtg/u en tussen 7:12 en 7:30 is de intensiteit hoger (ca. 4300 vtg/u). Tussen 7:30 en 8:00 is de intensiteit beduidend lager (ca. 3700 vtg/u). In de snelheidscontourplot is te zien dat dit precies het moment is waarop congestie is ontstaan. De rechterfiguur laat hetzelfde zien voor een andere periode en een andere referentie-intensiteit.

.....
 Figuur 2.2: Snelheidscontourplot (boven) en 'Slanted' curven met capaciteitsval (onder)



Het verschil tussen de twee capaciteiten is -1% tot -15% (Hoogendoorn, 2007) afhankelijk van het type bottleneck. Dit komt doordat de turbulente stroom bij congestie minder efficiënt is dan de laminaire stroom van de vrije doorstroming.

Bij filegolven, waarbij de kop van de file zich stroomopwaarts verplaatst, wordt er zelfs een capaciteitsval van 30% waargenomen. Het is echter onduidelijk waardoor dit verschil wordt veroorzaakt. Hier zal dan ook meer onderzoek naar gedaan moeten worden.

Papageorgiou et al. (1998) liet in een voorbeeld zien dat er een directe relatie bestaat tussen de uitstroom van een netwerk en de totale reistijd in een netwerk. In Figuur 2.3 zijn twee situaties weergegeven voor een snelweg met een toerit, (a) zonder toeritdosering en (b) met toeritdosering. Door de capaciteitsval is de uitstroom na het ontstaan van congestie ongeveer 1 tot 15% lager dan de capaciteit. In Figuur 2.3 (b) wordt aangenomen dat er toeritdosering wordt gebruikt om de capaciteit op de hoofdrijbaan te behouden. Deze strategie zal een wachtrij op de toerit creëren, maar omdat q_{cap} groter is dan q_{con} zal dit leiden tot een vermindering van de totale reistijd. De verbetering ΔTs (in %) van de totale reistijd wordt gegeven door:

$$\Delta Ts = \frac{q_{cap} - q_{con}}{q_{in} + d - q_{con}} 100$$

In het voorbeeld is de vraag 20 procent groter dan de capaciteit:

$$q_{in} + d = 1,2q_{cap}$$

De capaciteitsval wordt aangenomen op 5 procent:

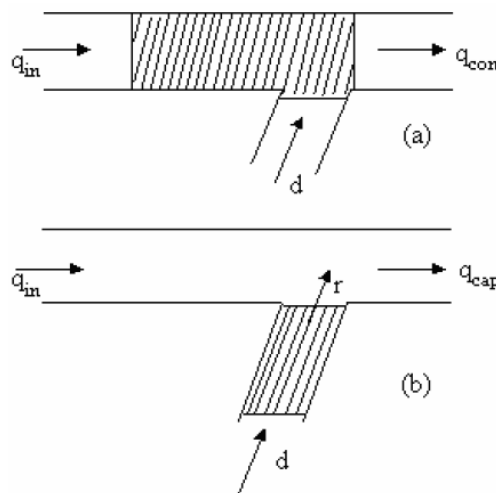
$$q_{con} = 0,95q_{cap}$$

Hieruit volgt een verbetering van de reistijd:

$$\Delta Ts = 20\%$$

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het belangrijk is om congestie te voorkomen of te verminderen en dat hierdoor de totale reistijd in het netwerk mogelijk aanzienlijk af kan nemen.

Figuur 2.3: Twee situaties (a) zonder toeritdosering en (b) met toeritdosering



2.2.2 Verkeersstroomtheorie

Verschillende auteurs hebben laten zien dat verkeersstromen niet stabiel zijn. Hiermee wordt bedoeld dat in specifieke verkeersomstandigheden een kleine verstoring uit kan groeien tot congestie. Kerner (2001) liet zien dat er drie verschillende toestanden van het verkeer kunnen worden onderscheiden.

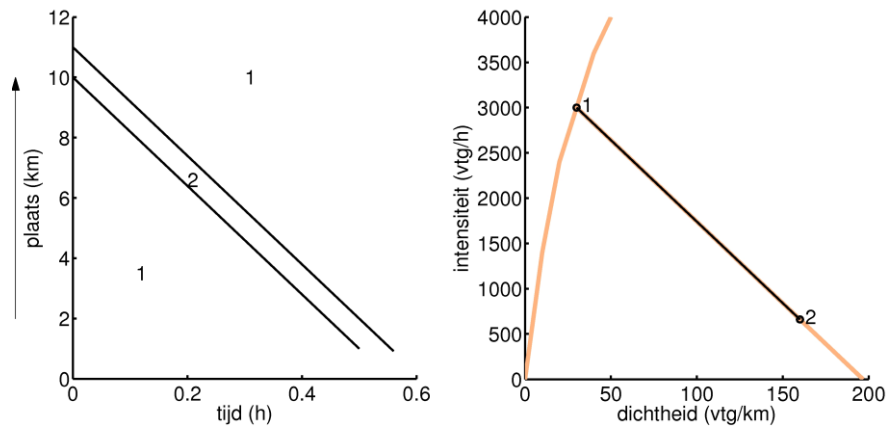
1. Vrije afwikkeling of ongedwongen verkeersstroom;
2. Gesynchroniseerde afwikkeling: deze toestand geeft een gedwongen verkeersstroom weer, waarbij het verkeer in de file nog beweegt. De toestand wordt gekenmerkt door kleine

-
- snelheidsverschillen tussen de rijstroken en het feit dat het uit metastabiel en instabiel verkeer bestaat;
3. Filegolf: bestaat uit files waarin het verkeer stilstaat. Deze file verplaatst zich stroomopwaarts met een snelheid van ca. 18 km/u. Deze snelheid wordt bepaald door de manier waarop voertuigen uit de file accelereren.

Gesynchroniseerde afwikkeling ontstaat ter hoogte van bottlenecks, waar de vraag hoger is dan de capaciteit. Als de dichtheid in de gesynchroniseerde verkeersstroom hoog genoeg is zullen kleine verstoringen stroomopwaarts propageren. Instabiliteit van de gesynchroniseerde verkeersstroom zal ervoor zorgen dat de verstoringen stroomopwaarts steeds groter worden. Om filegolven op te kunnen lossen moet de toestand van het verkeer metastabiel zijn, aangezien ze in de stabiele fase uit zichzelf oplossen en snelheidslimieten in de instabiele fase nieuwe verstoringen kunnen veroorzaken. In de metastabiele fase hebben snelheidslimieten de mogelijkheid (als de snelheidsbeperking klein genoeg is) om de filegolf te laten veranderen in een verstoring die klein genoeg is om uit zichzelf te verdwijnen.

Op basis van schokgolftheorie van Lighthill en Whitham (1955) kan de dynamiek van een file voorspeld worden. De schokgolftheorie gaat verder dan hier besproken wordt, maar voor de eenvoud wordt hier het resultaat besproken dat noodzakelijk is om verschillende benaderingen met dynamische maximumsnelheden beter te begrijpen. Eén van de fundamentele resultaten van de schokgolftheorie is dat er een relatie is tussen het tijd-plaatsdiagram van de verkeers toestanden (zoals afgebeeld links in Figuur 2.4) en het dichtheid-intensiteitdiagram (zoals afgebeeld rechts in Figuur 2.4). Het tijd-plaatsdiagram toont de verkeers toestanden op een traject (langs de verticale as) en de propagatie van de toestanden over tijd (in horizontale richting). In Figuur 2.4 is er een korte file (toestand 2) die stroomopwaarts propageert, en vrij stromend verkeer stroomop- en stroomafwaarts ervan (toestand 1). In het dichtheid-intensiteitdiagram zijn de overeenkomstige waarden van de toestanden te zien. Volgens schokgolftheorie propageert het front tussen de twee verkeers toestanden met een snelheid die overeenkomt met de richtingscoëfficiënt van de lijn in het dichtheid-intensiteit diagram die de twee toestanden verbindt. De lijnen links en rechts zijn dus parallel. Merk op dat de richtingscoëfficiënt zowel links als rechts voor een snelheid staat en de eenheid km/u heeft. De oranje lijnen geven ter indicatie het fundamenteel diagram weer. Het belang van deze relatie is dat het verloop van de verkeersdynamiek te voorspellen is, als de verschillende toestanden op een traject bekend zijn. Door de toestanden in het rechter figuur te verbinden kan de propagatie van de grensvlakken tussen de toestanden in de linker figuur geconstrueerd worden, wat het verloop van het verkeer volledig beschrijft.

.....
 Figuur 2.4: Volgens de schokgolftheorie is de propagatiesnelheid van het front tussen twee toestanden (linker figuur) hetzelfde als de richtingscoëfficiënt van de lijn die de twee toestanden verbindt in het dichtied-intensiteitdiagram (rechter figuur). De pijl geeft de rijrichting aan. (Hegyí, 2008)



2.3 Huidige situatie

Voor de inpassing van dynamische maximumsnelheden is het noodzakelijk om kennis te hebben van het huidige systeem in Nederland. Er moet namelijk interactie zijn tussen de dynamische maximumsnelheden en de Automatische Incident Detectie. Verder kan er iets geleerd worden van de effecten en problemen van het huidige systeem en kan dit gebruikt worden voor de keuze van een geschikte benadering van dynamische maximumsnelheden voor het verbeteren van de doorstroming.

2.3.1 Automatische Incident Detectie

Het Nederlandse autosnelwegennet kent een stelsel van in principe vaste snelheidslimieten. Op een groot deel van het Nederlandse wegennet geldt een vaste maximumsnelheid van 120 km/u. Op relatief onveilige wegen en op drukke wegen nabij de stedelijke gebieden geldt om milieuredenen een limiet van 100 km/u en probleemlocaties op het gebied van luchtkwaliteit komen in aanmerking voor een maximumsnelheid van 80 km/u.

Alleen bij filevorming, incidenten, slechte weersomstandigheden en werk in uitvoering worden er aangepaste snelheden getoond. In eerste instantie waren dit adviessnelheden, maar in 1992 is dit veranderd naar een verplichte maximumsnelheid. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van het MTM (motorway traffic management) systeem. Dit systeem is in de jaren 70 ontwikkeld met als uitgangspunten het verbeteren van de verkeersveiligheid, een betere benutting van de capaciteit en het verminderen van de milieuvervuiling. Een onderdeel van dit systeem is de Automatische Incident Detectie (AID). Als een incident betrouwbaar en snel genoeg zou kunnen worden gedetecteerd, zou het aankomend verkeer automatisch voor het incident gewaarschuwd kunnen worden en zo zouden kettingbotsingen voorkomen kunnen worden. Verder verwachtte men dat met een verkeersafhankelijke snelheidsregeling de voor de doorstroming optimale snelheid kon worden ingesteld. De ambitie om met lusedetectie ongevallen te detecteren is echter langzaam weggeëbd en is veranderd in een filebeveiliging.

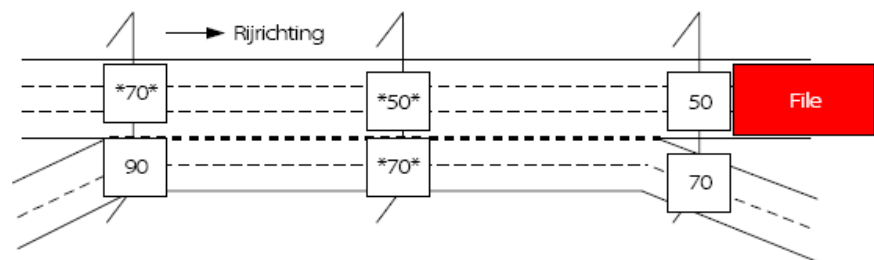
De AID werkt op basis van een vergelijking van de gemiddelde snelheid met een grenswaarde. De snelheid wordt per rijstrook berekend en

getoetst. Wanneer de snelheid onder een vooraf ingestelde waarde (meestal 35 km/u) komt dan treedt de AID in werking. Komt de snelheid weer boven een grenswaarde (meestal 50 km/u) dan zal het systeem zichzelf weer uitschakelen. Om de invloed van foutmeldingen te minimaliseren worden de rijtijden eerst gefilterd op te hoge snelheden (groter dan 200 km/u) en lage snelheden (kleiner dan 18 km/u). Hoge snelheden worden verwijderd, lage snelheden worden opgehoogd tot 18 km/u.

De standaardinstelling op 35 en 50 km/u is gekozen om te voorkomen dat het systeem snel opeenvolgend in- en uitschakelt. Dit moet omwille van de geloofwaardigheid van het systeem voorkomen worden. De snelheid voor de toetsing wordt berekend uit de rijtijden die door de detectielussen worden gemeten. De rijtijden worden afgevlakt om fluctuaties in de snelheden uit te dempen. De afgevlakte rijtijd wordt vervolgens omgerekend naar de snelheid. De snelheid is (bij huidige instelling) pas geldig als er minimaal 12 correcte rijtijden zijn gemeten.

Per rijbaan wordt vastgesteld of er sprake is van file. Met de huidige instellingen is alleen een [50] als aanvraag mogelijk (ingeleid met een [*70*] en [*50*]). Als de weg uit meer rijbanen in dezelfde rijrichting bestaat, dan krijgt de rijbaan zonder file een +20 maatregel, dit houdt in dat alle beelden met 20 km/u worden verhoogd.

Figuur 2.5: Plaatsing beelden bij meerdere rijbanen (Grontmij, 2002)



De configuratie van de detector- en de onderstations is opgenomen in de database. In de database wordt aangegeven welke verkeersstromen kunnen worden onderscheiden en hoe de beelden boven de weg worden geplaatst.

2.3.2 Effecten van Automatische Incident Detectie

Hoewel het systeem ontwikkeld is met als uitgangspunten het verbeteren van de verkeersveiligheid, een betere benutting van de capaciteit en het verminderen van de milieuvuiling, wordt het systeem nu vooral gebruikt als filebeveiliging. Er zijn verschillende onderzoeken gedaan naar de effecten van de AID op het gedrag van de weggebruiker.

Hanckmann (1998) onderzocht de effecten van de AID op het gedrag van weggebruikers. Hieruit bleek dat de keuze van een weggebruiker om een snelheidslimiet op te volgen een afweging is tussen de 'straf' en de 'beloning' voor zowel het (te) hard rijden als wel voor het opvolgen van de snelheidslimiet. In dit onderzoek zijn ook de MARE-gegevens geanalyseerd, waarin de psychologische theorie wordt onderschreven. Bij een beeldstand van [70] km/u, zal de gemiddelde snelheid enigszins een dalende trend vertonen (van 100 km/u naar \pm 90 km/u). Ook is er

direct na het verschijnen van de beeldstand [50] km/u geen directe snelheidsverlaging te constateren die hieraan wordt gerelateerd. In het snelheidsverloop in de MARE-grafieken is kort na het verschijnen van de beeldstand wel een verlaging van de snelheid te zien, die zelfs tot onder de 50 km/u raakt. Een logische verklaring hiervoor is dat de verkeerssituatie deze snelheidsverlaging "afdwingt".

Andere conclusies van het onderzoek zijn de positieve uitwerking op de verkeersveiligheid, doordat het attentieniveau van weggebruikers erdoor wordt verhoogd. De geringe naleving van de getoonde snelheden kan worden toegeschreven aan het feit dat de getoonde beelden eerst de status van adviessnelheid hadden, waarna deze in 1992 is gewijzigd in bindende maximumsnelheid. Dit laatste is echter bij veel weggebruikers niet bekend.

Er zijn ook enkele problemen geconstateerd in de werking van het huidige systeem. Met betrekking tot de detectie van file en de plaatsing van de beelden passeren filegolven soms een detectiepunt, zonder dat de AID een beeld toont (de snelheid van een filegolf is niet laag genoeg. Hierdoor ontstaat er de mogelijkheid dat de AID geen file meet terwijl tussen de detectiepunten wel een filegolf/filestaart aanwezig is. Ook kan het door een kleinere afstand tussen de portalen voorkomen dat het verkeer pas op zeer korte afstand wordt gewaarschuwd voor de filestaart. Soms is de afstand tussen de lussen namelijk maar 200 tot 300 meter in plaats van 500 meter, waardoor het verkeer pas op 250-500 meter wordt gewaarschuwd.

Uit de effecten en problemen met de AID kan geconcludeerd worden dat er op het moment van inschakelen al sprake van congestie is en dat de AID er alleen voor zorgt dat filestaartongevallen worden voorkomen. Verder moet er rekening gehouden worden met de psychologische theorie, die inhoudt dat mensen zich alleen aan een aangepaste snelheidslimiet houden als ze er ook het nut van inzien. Ook is de afstand tussen detectoren belangrijk voor de effectiviteit van het systeem.

2.4 Mogelijke regelfilosofieën met dynamische maximumsnelheden

Er zijn verschillende manieren waarop dynamische maximumsnelheden kunnen worden toegepast. Ook wordt het fundamenteel diagram anders gemodelleerd bij toepassing van dynamische maximumsnelheden. Deze theorie komt terug in de benaderingen met dynamische maximumsnelheden die in paragraaf 2.5 beschreven worden.

In de literatuur worden snelheidslimieten op drie verschillende manieren gebruikt. De eerste filosofie legt de nadruk op het homogeniseren van de verkeersstroom, terwijl de tweede zich focust op het voorkomen of oplossen van files door de instroom te beperken met behulp van snelheidslimieten. Bij de derde filosofie moet een snelheidsverhoging op kritische momenten ervoor zorgen dat het ontstaan van congestie wordt uitgesteld.

De achterliggende gedachte van homogeniseren is dat de snelheidslimieten de snelheidsverschillen moeten verminderen, waardoor er een stabielere (en veiligere) verkeersstroom gerealiseerd kan worden. Hierbij worden er snelheden gebruikt die iets hoger liggen dan de kritische snelheid. Hierdoor wordt de doorstroming niet beperkt, maar alleen de gemiddelde snelheid lichtelijk verlaagd. In theorie kan dit de tijd tot verstoringen vergroten, maar er kunnen geen filegolven voorkomen of opgelost worden. In een aantal experimenten in de praktijk heeft het homogeniseren geleid tot een iets stabielere en veiligere verkeersstroom, maar er was geen significante verbetering van de doorstroming waarneembaar.

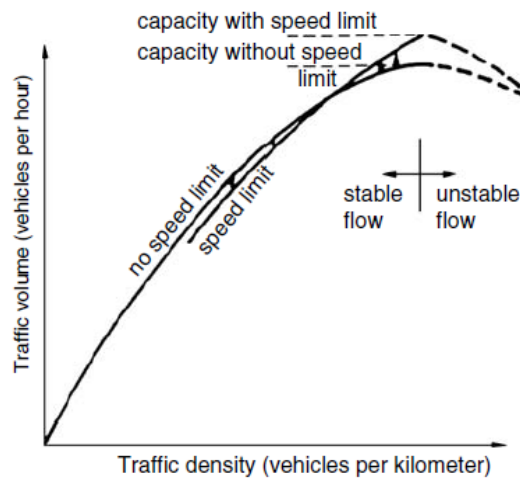
Het voorkomen of oplossen van files focust zich meer op het voorkomen van te hoge dichtheden en gebruikt snelheden die lager zijn dan de kritische snelheid. Hierdoor wordt de instroom in het congestiegebied beperkt. Door de gebieden met congestie op te lossen kan er een betere doorstroming behaald worden dan in de benadering met het homogeniseren.

In het Dynamax-project op de A12 tussen Bodegraven en Woerden is gebruik gemaakt van deze regel filosofie en is aangetoond dat hiermee succesvol filegolven kunnen worden opgelost. Op deze benadering zal verder ingegaan worden bij de bespreking van de verschillende benaderingen van dynamische maximumsnelheden in paragraaf 2.5.

De snelheidsverhoging op kritieke momenten moet ervoor zorgen dat het ontstaan van file uitgesteld wordt. Als er op een traject een lagere snelheid geldt dan de kritische snelheid is de dichtheid voordat er file ontstaat hoger, waardoor er minder ruimte is om weefbewegingen te uit te voeren. Door in de randen van de spits de snelheid tijdelijk te verhogen zal de dichtheid lager zijn en de spreiding in snelheden groter worden, waardoor het ontstaan van congestie uitgesteld kan worden. Met deze benadering is geëxperimenteerd in de 80 km-zone op de A12 bij Voorburg. Deze benadering zal verder worden toegelicht in paragraaf 2.5.

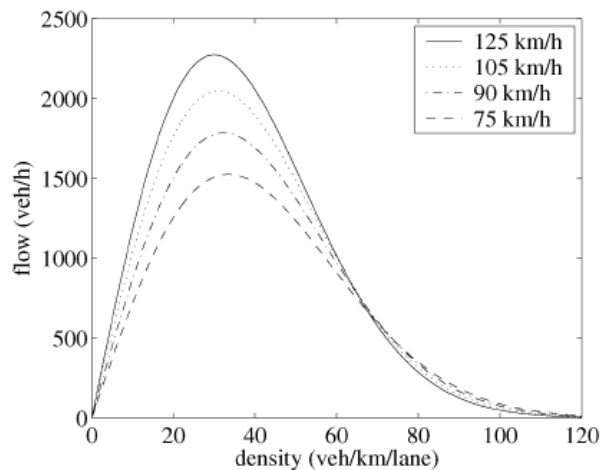
Er zijn in het verleden onderzoeken gedaan met betrekking tot dynamische maximumsnelheden. Ze laten zien dat dynamische maximumsnelheden een homogeniserend effect hebben, zowel voor de individuele voertuigen als voor de verschillende rijstroken. Figuur 2.6 (Zackor, 1991) laat zien dat dynamische maximumsnelheden bij lagere intensiteiten zorgen voor een lagere gemiddelde snelheid, terwijl bij hogere intensiteiten de gemiddelde snelheid toeneemt door het stabiliserende effect. De capaciteit en snelheid zouden hierdoor tegelijkertijd met 5-10 % kunnen toenemen. Dit had er vooral mee te maken dat de weggebruikers dachten dat het om adviessnelheden ging.

Figuur 2.6: Verandering van het fundamenteel diagram door snelheidslimieten (Zackor, 1991)



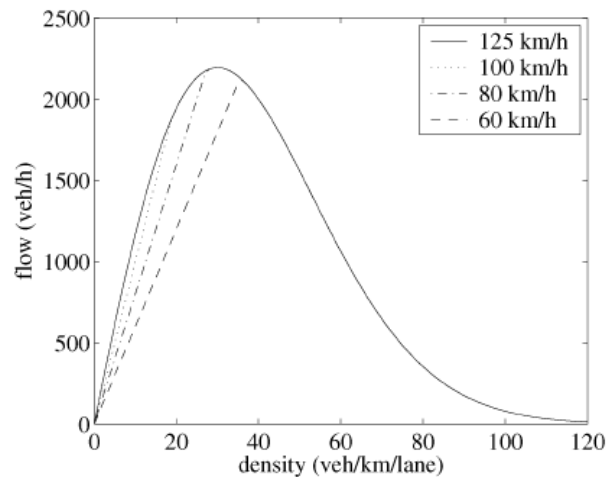
In een onderzoek van Cremer (1979) werd aangenomen dat de relatie tussen de intensiteit en dichtheid lineair afhankelijk is van de snelheidslimiet, zoals weergegeven in Figuur 2.7.

Figuur 2.7: Verandering van het fundamenteel diagram door snelheidslimieten (Cremer, 1979)



Volgens Hegyi et al. (2005) is het echter onrealistisch dat voertuigen met een lagere snelheid beïnvloed worden door de snelheidslimiet. Ook wordt in alle gevallen de capaciteit verkleind, terwijl er geen reden is om aan te nemen dat snelheden boven de kritische snelheid, de capaciteit verkleinen. In de benadering van Hegyi et al. (2005) is het fundamenteel diagram alleen aangepast voor dichtheden waar de snelheden normaal gesproken hoger zouden zijn. Hierbij is aangenomen dat dynamische maximumsnelheden ervoor zorgen dat het linker gedeelte van het fundamenteel diagram vervangen wordt door een rechte lijn, waarvan de helling gelijk is aan de getoonde snelheidslimiet. (zie Figuur 2.8)

Figuur 2.8: Verandering van het fundamenteel diagram door snelheidslimieten (Hegyi, 2005)



Door dynamische snelheidslimieten bovenstreams van een bottleneck toe te passen, wordt de instroom in de bottleneck beperkt, waardoor het ontstaan van congestie kan worden uitgesteld. De afname van de instroom heeft te maken met de hogere dichtheden die ontstaan tijdens de schakeling naar een lagere snelheidslimiet.

De ontwikkeling van een geschikte benadering zal vooral gericht moeten zijn op de tweede filosofie, waarbij de instroom beperkt wordt door snelheden onder de kritische snelheid toe te passen, om zo bijvoorbeeld filegolven op te lossen. De theoretische impact die dynamische snelheidslimieten kunnen hebben is het best weergegeven in het fundamenteel diagram van Hegyi et al. (2005), omdat alleen de dichtheden waar de snelheden normaal gesproken hoger zijn worden beïnvloed.

2.5 Verschillende benaderingen van dynamische maximumsnelheden

In deze paragraaf zal er aandacht worden besteed aan verschillende benaderingen van dynamische maximumsnelheden die tot nu zijn ontwikkeld om de doorstroming te verbeteren. Hierdoor moet er meer duidelijkheid komen in hoeverre de effecten van dynamische maximumsnelheden significant zijn en dus ook breder kunnen worden toegepast. In dit rapport zal er daarom gekeken worden wat ertoe geleid heeft dat de benadering juist wel of niet succesvol is op het gebied van doorstroming. Ook moet het inzicht geven hoe een bepaalde maatregel toegepast moet worden om de doorstroming te verbeteren.

Bij de beschrijving van de verschillende benaderingen komen steeds de criteria aan bod zoals genoemd in de inleiding, om uiteindelijk tot een selectie van benaderingen te komen die mogelijk geschikt zijn voor een bredere toepassing. Er wordt onderscheid gemaakt in benaderingen waarbij er alleen dynamische maximumsnelheden gebruikt worden (Paragraaf 2.5.1) en benaderingen met een combinatie van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering (Paragraaf 2.5.2).

In Paragraaf 2.6 worden de verschillende benaderingen beoordeeld op hun geschiktheid.

2.5.1 Benaderingen met dynamische maximumsnelheden

De verschillende benaderingen met dynamische maximumsnelheden kunnen onderscheiden worden door middel van de gebruikte regelfilosofie. Per regelfilosofie zijn hieronder de verschillende benaderingen weergegeven. Een uitgebreide beschrijving van de benaderingen is te vinden in Bijlage I.

Homogeniseren

- Dyvers;
- Snelheidsdekens;
- Corridor Management in Duitsland;
- Dynamische maximumsnelheden op een gedeelte van de M25 in Londen.

Instroombeperking

- Dynamax – A12 Bodegraven – Woerden;
- Optimale coördinatie van variabele snelheidslimieten tegen filegolven;
- Distributed Controller Design voor dynamische maximumsnelheden tegen filegolven op snelwegen;
- Dosering op de hoofdrijbaan met dynamische snelheidslimieten;
- Dynamische snelheidslimieten tijdens wegwerkzaamheden.

Snelheidsverhoging

- Dynamax – A12 Voorburg.

Een deel van deze benaderingen is al in de praktijk toegepast. Dit zijn de homogeniserende benaderingen en de benaderingen van Dynamax op de A12. Zoals uit paragraaf 2.4 al geconcludeerd is hebben de homogeniserende benaderingen niet tot een verbetering van de doorstroming geleid. Uit het experiment op de A12 Voorburg blijkt (TNO, 2010) dat een snelheidsverhoging ervoor kan zorgen dat het ontstaan van file uitgesteld wordt, waarmee hogere capaciteiten kunnen worden behaald. Uit het experiment met dynamische maximumsnelheden op de A12 tussen Bodegraven en Woerden is gebleken dat filegolven succesvol opgelost kunnen worden door de instroom tijdelijk te beperken (TNO, 2010). De andere instroombeperkende benaderingen zijn vergelijkbaar, maar nog niet in de praktijk toegepast. De benaderingen 'Optimale coördinatie van variabele snelheidslimieten tegen filegolven' en 'Dosering op de hoofdrijbaan met dynamische snelheidslimieten' maken echter gebruik van voorspellingen, waarmee filegolven ook voorkomen kunnen worden. Bij laatstgenoemde benadering wordt er naast het gebruik van dynamische maximumsnelheden ook gekeken naar het gebruik van een doseerlicht op de hoofdrijbaan om filegolven op te lossen. Het nadeel van deze instroombeperkende benaderingen is dat ze vooral geschikt zijn om toegepast te worden op snelwegen met weinig op- en afritten. Het is echter wel mogelijk om een benadering uit te breiden met toeritdosering.

2.5.2 Benaderingen met dynamische maximumsnelheden en toeritdosering

Dynamische maximumsnelheden kunnen ook gecombineerd worden met toeritdosering. De benaderingen die hiervan gebruik maken

worden hier kort toegelicht. Voor een uitgebreide beschrijving van de benaderingen wordt verwezen naar Bijlage II.

- Adaptieve toeritdosering en variabele snelheidslimieten: een genetisch-fuzzy benadering;
- Geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten;
- Model Predictive Control (MPC) voor een optimale coördinatie van toeritdosering en variabele snelheidslimieten.

Bij alle benaderingen wordt er gebruik gemaakt van de regelfilosofie instroombeperking, waarmee files opgelost of voorkomen kan worden. De benaderingen zijn nog niet de praktijk toegepast. Het voordeel van deze benaderingen is dat ze ook gebruikt kunnen worden op snelwegen met veel op- en afritten, omdat dynamische maximumsnelheden worden gecombineerd met toeritdosering. De eerste benadering maakt gebruik van fuzzy regels om de regeling te bepalen, waarvoor veel kennis en ervaring nodig is, wat het lastiger maakt om het in de praktijk toe te passen. De andere twee benaderingen maken gebruik van voorspellingen om filegolven te voorkomen en op te lossen. Bij de toepassing in de praktijk moet echter rekening gehouden worden met de rekencomplexiteit, waardoor de effectiviteit van het algoritme af kan nemen.

2.6 Beoordeling benaderingen

Om te kunnen bepalen welke benaderingen geschikt zijn om de doorstroming te verbeteren en voor een bredere toepassing in de praktijk, worden de benaderingen beoordeeld op basis van de selectiecriteria uit paragraaf 2.1. De selectiecriteria en benaderingen zijn weergegeven in Tabel 2.1. De verschillende benaderingen worden beoordeeld met de waarden -1, 0 en 1. Waarbij -1 aangeeft dat de benadering op dat punt niet of minder geschikt is voor een bredere toepassing en een 1 aangeeft dat de benadering (zeer) geschikt is. Bij een algoritme dat congestie uitstelt worden bijvoorbeeld 0 punten toegekend, bij voorkomen 1 punt en bij oplossen ook 1 punt. Voor de geschiktheid van een benadering is een eerste voorwaarde dat het voor een significante doorstromingsverbetering zorgt. Dit wordt meegenomen in de beoordeling door dit criterium twee keer zo zwaar mee te laten tellen. Ook het criterium toepasbaarheid telt twee keer zo zwaar mee in de beoordeling, omdat dit een belangrijke vereiste is voor een geschikte benadering. Uiteindelijk worden alle scores bij elkaar opgeteld, waaruit een beperkt aantal geschikte benaderingen zullen komen.

Tabel 2.1: Beoordeling van de verschillende benaderingen

	1. Doorstromingsverbetering	2a. voorkomen/uitstellen	2b. oplossen	3. Regelniveau	4. Naleving	5. Eigenschappen locatie	6. Toepasbaarheid	7. Praktische toepassing	8. Bruikbaarheid	Totaal
Dyvers	-2	0	-1	0	1	1	2	1	-1	1
Snelheidsdekens	0	0	-1	0	0	1	2	1	0	3
Corridor Management Duitsland	0	0	-1	0	0	0	2	1	-1	1
M25 Londen	0	0	-1	0	1	1	2	1	1	5
Dynamax - A12 Bodegraven-Woerden	2	-1	1	0	1	1	2	1	1	8
Optimale coördinatie van variabele snelheidslimieten om filegolven te voorkomen	2	1	1	1	1	0	-2	0	1	5
Distributed Controller Design voor dynamische snelheidslimieten tegen filegolven op snelwegen	2	-1	1	0	1	0	2	0	1	6
Dosering op de hoofdrijbaan met dynamische snelheidslimieten	2	1	1	1	0	1	-2	0	1	5
Dynamische snelheidslimieten tijdens wegwerkzaamheden	2	0	-1	0	0	1	-2	0	1	1
Dynamax - A12 Voorburg	2	0	-1	0	1	1	2	1	1	7
Adaptieve toeritdosering en variabele snelheidslimieten: een genetisch-fuzzy benadering	2	0	1	0	0	1	0	0	-1	3
Geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten	2	1	1	1	0	1	0	0	1	7
MPC voor een optimale coördinatie van toeritdosering en variabele snelheidslimieten	2	1	1	1	1	1	0	0	1	8

Uit Tabel 2.1 kan geconcludeerd worden dat de homogeniserende benaderingen niet geschikt zijn om breder toegepast te worden. De benaderingen waarbij gebruik gemaakt wordt van een beperking van de instroom zijn wel geschikt om breder toegepast te worden. Hierbij

scoren vooral de benaderingen “Dynamax – A12 Bodegraven – Woerden” en de “Distributed Controller” hoog. Als dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering zijn de benaderingen “geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten” en “MPC voor optimale coördinatie van toeritdosering met variabele snelheidslimieten” geschikt om breder toegepast te worden. Deze laatste twee benaderingen zijn in staat om congestie te voorkomen en op te lossen. Hoewel het verschil tussen deze benaderingen klein lijkt bij de beoordeling, wordt er voorkeur gegeven aan de manier van voorspellen zoals dit bij MPC gedaan wordt. Hierbij wordt namelijk de verkeerssituatie teruggekoppeld naar de regelaar. Er moet echter wel rekening gehouden worden met de rekencomplexiteit. Een voordeel van deze benaderingen is dat ook files bij toeritten kunnen worden opgelost door de combinatie met toeritdosering.

Van deze instroombeperkende benaderingen is alleen “Dynamax – A12 Bodegraven – Woerden” in de praktijk getest.

De enige benadering die gebruik maakt van een snelheidsverhoging is “Dynamax – A12 Voorburg”. Hiermee moet het ontstaan van congestie uitgesteld worden. Ook deze benadering is al in de praktijk getest. Beide proeven hebben laten zien dat de doorstroming verbeterd wordt door de toepassing van dynamische maximumsnelheden.

2.7 Conclusie

In het begin van dit hoofdstuk zijn de volgende deelvragen gesteld:

1. *Wat zijn de verschillen in de benadering van dynamische maximumsnelheden en wat is het effect op de doorstroming?*
Het verschil in benadering van dynamische maximumsnelheden wordt vooral bepaald door de regelfilosofie die gebruikt wordt. Mogelijke regelfilosofieën zijn homogeniseren, instroombeperking en snelheidsverhoging. Elke regelfilosofie heeft een ander effect op de doorstroming.
2. *Onder welke omstandigheden op een locatie kunnen dynamische maximumsnelheden een positief effect hebben op de doorstroming?*
Er zijn verschillende verkeerssituaties waarbij dynamische maximumsnelheden effectief kunnen zijn. Dit zijn filegolven, staande files bij toeritten en doorstromingsproblemen in 80 km-zones.
3. *Welke factoren kunnen van invloed zijn op de impact van dynamische maximumsnelheden?*
Andere factoren die bepalend zijn voor de impact van dynamische maximumsnelheden zijn de weglay-out en de manier van handhaven.

Hieronder zal worden samengevat welke regelfilosofieën, verkeerssituaties, soorten weglay-out en manier van handhaven geschikt zijn voor het toepassen van dynamische maximumsnelheden en waarmee de doorstroming verbeterd kan worden.

Regelfilosofie: belangrijkste factor voor een positief effect van dynamische maximumsnelheden op de doorstroming.

- *Homogeniseren:* hierbij worden snelheden gebruikt rond de kritische snelheid, waardoor het ontstaan van file uitgesteld kan worden. Bij verschillende experimenten is echter geen verbeterde doorstroming geconstateerd, waardoor deze benadering minder geschikt is om toegepast te worden.
- *Instroombeperking:* hierbij worden er snelheden gebruikt die lager liggen dan de kritische snelheid. Deze benadering kan gericht zijn op het voorkomen van congestie door gebruik te maken van voorspellingen, zoals bij "MPC" en "geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten" het geval is. Ook kan er pas ingegrepen worden als er al congestie aanwezig is, zoals bij "Specialist" en "Distributed Controller", waarbij filegolven succesvol opgelost worden.
- *Snelheidverhoging:* hiermee moet het ontstaan van congestie uitgesteld worden doordat er meer ruimte ontstaat voor wevend verkeer. Deze benadering wordt toegepast in de Dynamaxproef op de A12 bij Voorburg, waarbij de snelheid in de randen van de spits verhoogd wordt van 80 naar 100 km/u.

Verkeerssituatie: de benaderingen die hierboven zijn beschreven bleken geschikt in de volgende verkeerssituaties:

- *Filegolven:* hierbij propageert de kop van de file met een snelheid van 18 km/u stroomopwaarts. De oplosbaarheid van een filegolf is afhankelijk van de karakteristieken van het verkeer in en rondom de filegolf. Als de intensiteiten op toeritten te hoog worden zal een combinatie van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering noodzakelijk zijn om een zo hoog mogelijk doorstroming te behalen.
- *Staande files bij toeritten:* één van de kenmerken van dit type file is dat de kop van de file op dezelfde locatie blijft. Benaderingen die hiervoor geschikt zijn, zijn "MPC" en "geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten".
- *Doorstromingsproblemen in 80 km-zones:* bij 80 km-zones, waarbij weefbewegingen moeilijker verlopen door homogeen rijgedrag kan een maatregel zoals op de A12 bij Voorburg overwogen worden. Door de snelheid te verhogen ontstaat er meer ruimte voor weefbewegingen.

Dynamische maximumsnelheden kunnen alleen effectief toegepast worden als het verkeer in de metastabiele toestand verkeert, omdat hierdoor geen nieuwe verstoringen kunnen ontstaan, maar juist verstoringen opgelost kunnen worden.

Weglay-out: niet alle benaderingen zijn geschikt voor elke weglay-out. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de keuze van een benadering.

- *Aanwezigheid van toeritten:* als de intensiteiten op de toeritten toenemen, moet er gekozen worden voor een benadering waarbij dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering.

-
- *Grootte van het netwerk*: als het traject waarover dynamische maximumsnelheden worden toegepast langer wordt, dan zal de rekentijd bij voorspellende benaderingen zoals "MPC" en "geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten" toenemen, waardoor effectiviteit van het algoritme afneemt. Er kan dan beter voor een simpelere benadering gekozen worden zoals "Specialist" of "Distributed Controller".

Handhaving: de manier van handhaven kan van invloed zijn op het effect van dynamische maximumsnelheden. Bij de effecten van de AID en Specialist is te zien dat de opvolging van de snelheden mede afhankelijk is van de dichtheid indien er geen strikte handhaving aanwezig is. Een lagere snelheidslimiet zonder strikte handhaving kan hetzelfde effect hebben als een hogere snelheid met strikte handhaving.

In deze literatuurstudie zijn de mogelijkheden van dynamische maximumsnelheden geïnterpreteerd en is duidelijk geworden welke factoren van invloed zijn op het effect op de doorstroming. Deze kennis kan gebruikt worden voor de selectie van geschikte locaties, waarbij vooral rekening gehouden moet worden met de verkeersomstandigheden waarin dynamische maximumsnelheden effectief zijn. Afhankelijk van de eigenschappen van de locatie kan vervolgens bepaald worden welke benadering van dynamische maximumsnelheden geschikt is voor die locatie en hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden.

3. Uitbreiding dynamische maximumsnelheden

3.1 Inleiding

In de literatuurstudie zijn er een aantal benaderingen genoemd die alleen geschikt zijn op een traject met weinig toeritten of toeritten met lage intensiteiten. Benaderingen die wel toegepast kunnen worden op trajecten met veel toeritten maken gebruik van een voorspellend algoritme. Het nadeel hiervan is dat de rekencomplexiteit toeneemt bij grotere netwerken en de benadering dus niet overal toegepast kan worden.

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op een mogelijke uitbreiding van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering, waarmee filegolven opgelost kunnen worden. Als uitgangspunt wordt hierbij gebruik gemaakt van het algoritme waarmee geëxperimenteerd is op de A12 tussen Bodegraven en Woerden.

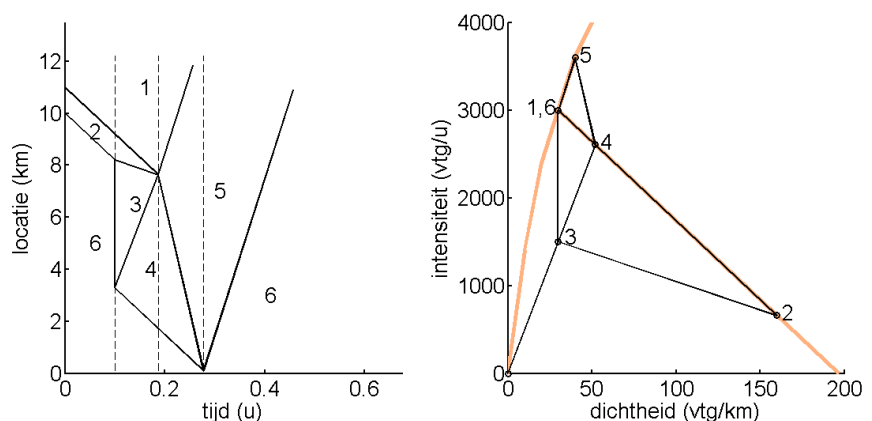
Om de noodzakelijke uitbreiding toe te lichten zal in paragraaf 3.2 eerst ingegaan worden op de regeling waarbij geen rekening gehouden wordt met toeritten. In paragraaf 3.3 zal toegelicht worden wat het effect van toeritten op de regeling is. Vervolgens zal in paragraaf 3.4 ingegaan worden op de uitbreiding met toeritdosering. Hierbij wordt aangetoond dat filegolven die met dynamische maximumsnelheden niet op te lossen zijn, bij een combinatie met toeritdosering mogelijk wel opgelost kunnen worden.

3.2 Regeling met dynamische maximumsnelheden

De aanpak om filegolven op te lossen bestaat uit een aantal stappen, die hieronder beschreven zullen worden.

In Figuur 3.1 is een voorbeeld gegeven van een filegolf op een traject zonder toeritten die oplosbaar is.

Figuur 3.1: Tijd-plaats diagram van de grensvlakken tussen de verschillende toestanden (links) en de bijbehorende toestanden (rechts)



Zodra de filegolf (toestand 2) wordt gedetecteerd, worden de snelheidslimieten stroomopwaarts ervan aangepast. Dit leidt tot een

toestandsverandering van toestand 6 naar toestand 3. Toestand 3 heeft dezelfde dichtheid als toestand 6, omdat de dichtheid niet verandert bij een instantane snelheidsverlaging op een traject. Zoals te zien is in het dichtheid-intensiteit diagram zal het front tussen toestand 2 en 3 langzamer stroomopwaarts propageren dan het front tussen toestand 1 en 2, en daarom zal de filegolf op den duur oplossen. De lengte van het traject waarover de snelheidslimieten gebruikt moeten worden, wordt zodanig gekozen dat gebied 3 de filegolf precies oplost.

Aan de stroomopwaartse kant waar de snelheidslimieten aanstaan, zal het verkeer instromen met een snelheid die overeenkomt met de snelheidslimiet en een maximale intensiteit gegeven de snelheidslimiet. Dit is toestand 4.

Als de filegolf is opgelost, blijft er nog een gebied over waar de snelheidslimieten actief zijn (gebied 4) en waar een gemiddelde dichtheid heerst. Een aanname in deze theorie is dat het verkeer uit een dergelijke toestand efficiënter uit kan stromen dan vanuit een filegolf. Het verkeer dat gebied 4 verlaat zal dus een hogere intensiteit en een hogere snelheid hebben dan toestand 4. Deze toestand wordt toestand 5 genoemd. Dit leidt tot een stroomopwaarts propagerend front tussen gebied 4 en 5, waardoor gebied 4 uiteindelijk oplost, zoals te zien is in Figuur 3.1. Uiteindelijk is de stroomopwaarts propagerende filegolf omgezet in een stroomafwaarts propagerende golf (in vrije afwikkeling) die de voertuigen zo snel mogelijk het traject uit laat stromen.

Om de oplosbaarheid te beoordelen worden eerst alle toestanden in het regelschema bepaald. De gebieden direct stroomop- en afwaarts van de filegolf die niet als filegolf geassocieerd worden, worden geassocieerd als verkeer in vrije afwikkeling. Hieronder wordt beschreven hoe de toestanden berekend worden:

- Voor gebied 1 (stroomafwaarts) en 6 (stroomopwaarts) van de filegolf wordt de gemiddelde dichtheid en gemiddelde intensiteit bepaald op basis van MoniCa metingen. In het voorbeeld wordt aangenomen dat deze twee toestanden gelijk zijn.
- Voor gebied 2 wordt de intensiteit van gebied 2 gebruikt en voor de dichtheid wordt gebruik gemaakt van de stroomafwaartse toestand en de berekende frontsnelheid.
- Toestand 3 volgt direct uit toestand 6 en de waarde van de effectieve snelheidslimiet.
- Toestand 4 is een ontwerpvariabele en komt overeen met de theoretische maximale intensiteit en dichtheid bij de gegeven snelheid dat nog niet tot instabiliteit leidt.
- Toestand 5 is een ontwerpvariabele en is een vaste waarde die afgeleid kan worden uit de maximale intensiteit en bijbehorende snelheid in de MoniCa data.

De filegolf wordt als oplosbaar geassocieerd als aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- Het regelschema geconstrueerd kan worden gegeven de 6 toestanden.
 - o De filegolf moet niet uit zichzelf oplossen, anders heeft regeling geen zin.

- De fronten aan de kop en de staart van gebied 2 moeten naar elkaar convergeren anders lost de filegolf niet op.
- Dezelfde voorwaarde geldt voor gebied 4.
- Toestand 5 moet een hogere intensiteit en een lagere dichtheid hebben dan toestand 4.
- De snelheid in toestand 5 moet hoger zijn dan de waarde van de toegepaste snelheidslimieten, anders hebben de snelheidslimieten geen effect.
- Het benodigde traject waar de snelheidslimieten actief zijn, moet binnen het stroomopwaartse gebied in vrije afwikkeling vallen.

De manier waarop de snijpunten in het regelschema bepaald kunnen worden, wordt uitgebreid beschreven in Bijlage III-a.

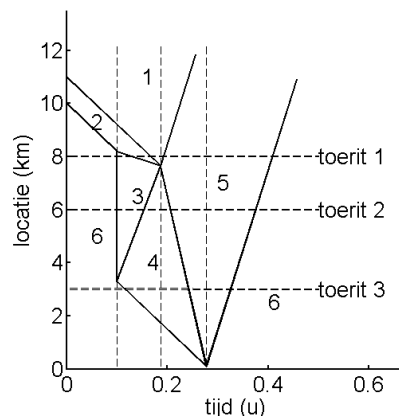
3.3 Invloed van toeritten op het regelschema

Het regelschema dat in paragraaf 3.2 beschreven is, is alleen toepasbaar als er geen toeritten op het traject aanwezig zijn of toeritten met lage intensiteiten.

In het regelschema dat weergegeven is in Figuur 3.1 wordt toestand 6 namelijk berekend door het gemiddelde te nemen van het gebied stroomopwaarts van de filegolf dat in vrije afwikkeling is. Er wordt dus aangenomen dat toestand 6 homogeen is. Als er zich een toerit stroomopwaarts van de filegolf bevindt is toestand 6 niet homogeen. Als hier geen rekening mee gehouden wordt bij de berekening van het regelschema is de instroom in de filegolf in werkelijkheid hoger dan berekend, waardoor de filegolf niet oplost. Om het regelschema op een goede manier te berekenen moet er dus onderscheid gemaakt worden in de toestand van het verkeer stroomafwaarts van de toerit en stroomopwaarts van de toerit.

In Figuur 3.2 zijn de mogelijke locaties van toeritten weergegeven die invloed kunnen hebben op de regeling. Voor deze locaties zal worden beschreven hoe de regeling er uit zou moeten zien.

Figuur 3.2: Mogelijke locaties van toeritten



Toerit 1 kruist in het plaats-tijddiagram de gebieden 1, 2, 3, 5 en 6. Toerit 2 kruist de gebieden 3, 4, 5 en 6. En toerit 3 kruist de gebieden

4, 5 en 6. Als een toerit een gebied kruist krijgen de toestanden een andere benaming, welke hieronder zijn weergegeven.

Geen toerit:	Toestandnr.
Stroomopwaarts van een toerit:	Toestandnr.+''
Stroomafwaarts van een toerit:	Toestandnr.+*
Stroomafwaarts van een toerit met toeritdosering:	Toestandnr.+^

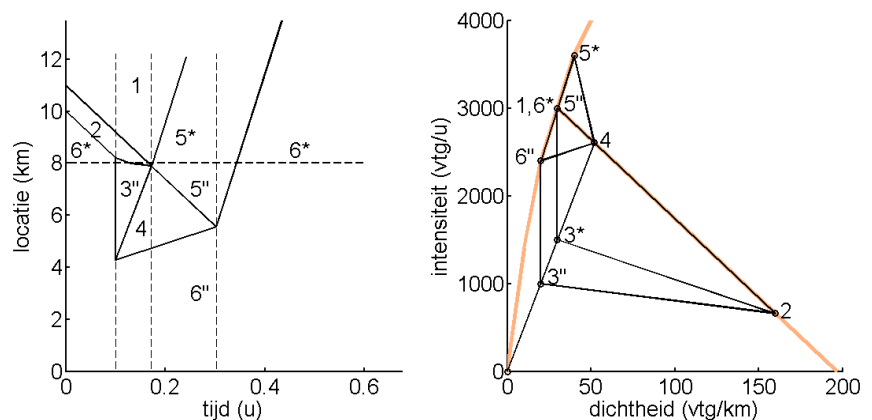
De toestanden stroomop- en afwaarts van een toerit kunnen afgeleid worden van de intensiteit op de toerit. In de gebieden 4 en 5 gelden stroomafwaarts van de toerit de vaste waarden voor intensiteit en snelheid. Stroomopwaarts van de toerit moet er ruimte overblijven voor invoegend verkeer en wordt de intensiteit verminderd met de intensiteit op de toerit.

Bij de berekening van het regelschema wordt aangenomen dat toestand 6'', (stroomopwaarts van de toerit) homogeen is. In de werkelijkheid is het echter mogelijk dat er zich in gebied 6'' ook toe- en afritten bevinden, waardoor de toestand niet meer homogeen is en het geconstrueerde regelschema onrealistisch is. In dit onderzoek wordt dit buiten beschouwing gelaten bij de berekening van het regelschema, maar voor de ontwikkeling van een algoritme waarbij rekening gehouden wordt met toeritten wordt aanbevolen om hier wel onderscheid in te maken.

Voor de berekening van het regelschema wordt aangenomen dat op het moment dat een filegolf een toerit passeert het niet mogelijk is om in te voegen. Dit houdt in dat toestand 2* en 2'' gelijk zijn. Wat er precies gebeurt met de toestand van de filegolf in de buurt van een toerit zal verder onderzocht moeten worden. Hetzelfde geldt voor toestand 1.

In Figuur 3.3 is te zien dat de filegolf stroomafwaarts van toerit 1 minder snel oplost dan stroomafwaarts van de toerit. (De frontsnelheid tussen toestand 2 en 3'' is hoger dan de frontsnelheid tussen toestand 2 en 3*). De grens tussen gebied 6'' en 4 propageert nu stroomafwaarts. Toestand 5'' wordt zo gekozen dat er stroomafwaarts van de toerit nog ruimte over blijft voor verkeer vanaf de toerit.

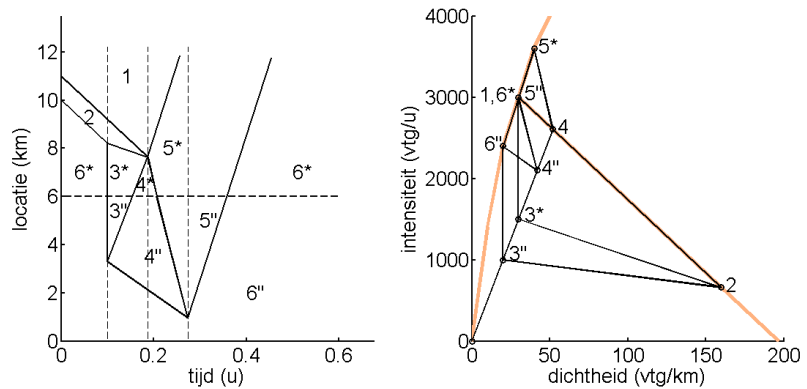
.....
 Figuur 3.3: Regelschema voor toerit 1



In Figuur 3.4 wordt het regelschema voor toerit 2 weergegeven. Stroomafwaarts van de toerit geldt in gebied 4 de maximale dichtheid

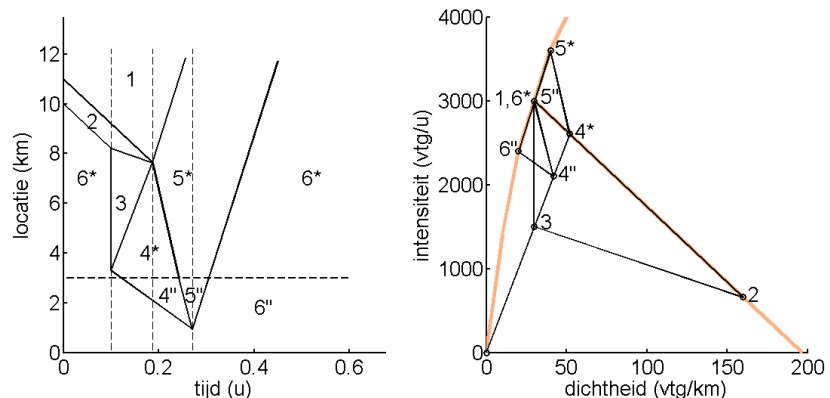
waarbij het verkeer nog stabiel is. Stroomopwaarts van de toerit is de intensiteit van toestand 4 verlaagd met de toeritstroom. Voor toestand 5 geldt hetzelfde.

Figuur 3.4: Regelschema voor toerit 2



In de situatie met de toerit op locatie 3 heeft de toerit alleen effect op de grens tussen toestand 4 en 5, de grens tussen toestand 4 en 6 en de grens tussen toestand 5 en 6. Door de keuze van de toestanden in dit voorbeeld zijn deze grenzen rechte lijnen. In de praktijk is het echter mogelijk dat er ter hoogte van de toerit een 'knik' in de grenzen zit. Het regelschema is weergegeven in Figuur 3.5.

Figuur 3.5: Regelschema voor toerit 3

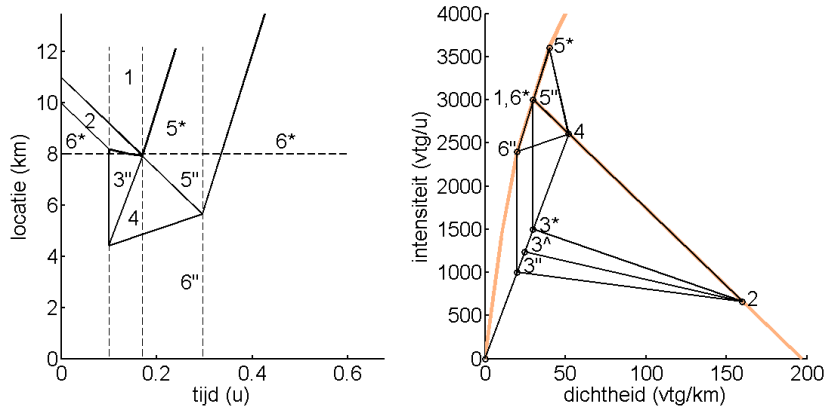


3.4 Uitbreiding met toeritdosering

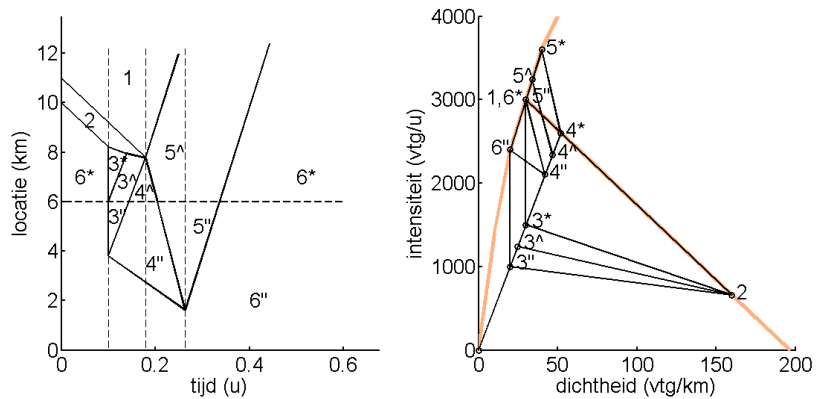
Toeritdosering kan ervoor zorgen dat het verschil tussen de intensiteit stroomopwaarts van de toerit en stroomafwaarts van de toerit minder groot wordt. De combinatie van toeritdosering met dynamische maximumsnelheden zorgt ervoor dat er een nieuwe toestand 3^{\wedge} ontstaat als gevolg van een directe snelheidsverlaging met een intensiteit die gelijk is aan de intensiteit van toestand $3''$ + de doseringsgraad (minimaal ca. 180 vtg/u). De filegolf zal hierdoor sneller oplossen. De toeritdosering heeft echter pas effect als de verlaagde intensiteit over het gehele gebied tussen de toerit en de filegolf aanwezig is. Als de toerit zich dus ter hoogte van het snijpunt van gebied 3, 4 en 6 bevindt zal het geen effect meer hebben op het oplossen van de filegolf. Wel kan de grootte van gebied 4 hierdoor veranderen, omdat de intensiteit hiervan dan ergens tussen $4''$ en 4^* ligt.

Om het effect van toeritdosering op de oplosnelheid te bekijken zal er gekeken worden naar de situatie met de toerit op locatie 1 en 2.

Figuur 3.6: Regelschema voor toerit 1 met toeritdosering



Figuur 3.7: Regelschema voor toerit 2 met toeritdosering

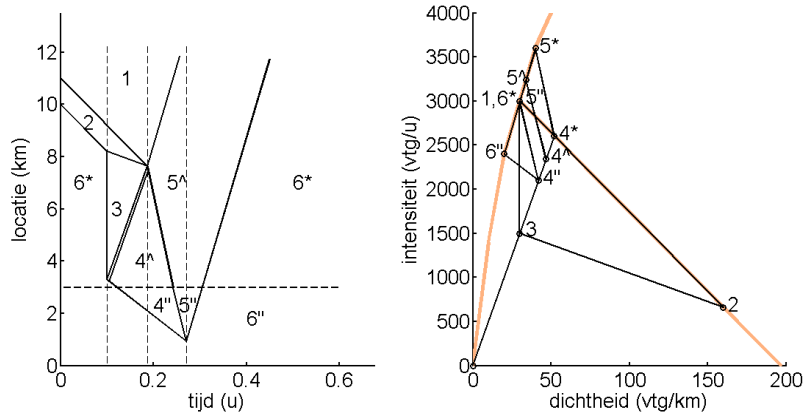


In Figuur 3.6 en Figuur 3.7 is te zien dat de filegolf sneller oplost als dynamische maximumsnelheden met toeritdosering wordt gecombineerd. Dit effect kan vergroot worden als de toerit zich dichter bij de filegolf bevindt of als de toeritdosering al actief is voordat de dynamische maximumsnelheden worden ingeschakeld. Hierdoor wordt gebied 3 zo klein mogelijk gehouden. Als de filegolf is opgelost kan de toeritdosering weer langzaam uitgeschakeld worden, om een nieuwe file te voorkomen. Als de toerit zich op locatie 1 bevindt wordt de toeritdosering in toestand 5 weer geleidelijk uitgeschakeld. Bij toerit 2 gebeurt dit in de toestanden 4 en 5.

In Bijlage III-b en Bijlage III-c wordt een toelichting gegeven op de berekening van de snijpunten van het regelschema voor toerit 1 en toerit 2.

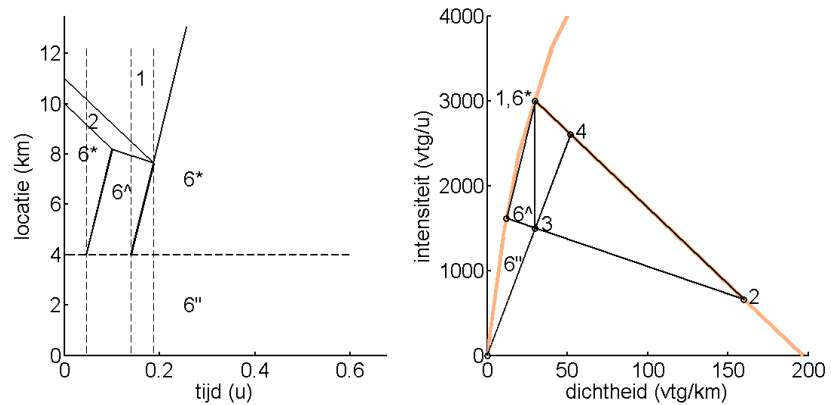
Als de toerit zich op locatie 3 bevindt heeft het toepassen van toeritdosering geen effect meer op de snelheid van het oplossen van de filegolf. Om het gebied met snelheidslimieten zo klein mogelijk te houden kan er echter alsnog toeritdosering toegepast worden in de gebieden 4 en 5. Deze situatie is weergegeven in Figuur 3.8. In Bijlage III-d wordt een uitgebreide beschrijving gegeven van de manier waarop de snijpunten van het regelschema voor toerit 3 berekend kunnen worden.

.....
 Figuur 3.8: Regelschema voor toerit 3 met toeritdosering



Dynamische maximumsnelheden zouden op locaties met toeritten ook geheel vervangen kunnen worden door toeritdosering. In Figuur 3.9 wordt alleen toeritdosering toegepast waarmee de filegolf met dezelfde snelheid oplost als in de situatie met alleen dynamische maximumsnelheden. In Figuur 3.9 is de benodigde beperking van de instroom weergegeven om hetzelfde effect te behalen als met dynamische maximumsnelheden. Nadat de filegolf is opgelost kan de toeritdosering weer langzaam uitgeschakeld worden. De intensiteit verloopt dan gelijk van 6^ naar 6* (in Figuur 3.9 alleen aangeduid met 6*).

.....
 Figuur 3.9: Regelschema bij toepassing van toeritdosering



De mogelijke instroombeperking is echter afhankelijk van de intensiteit op de toerit en de mogelijke doseringsgraad van de toeritdoseringsinstallatie in verband met een maximale lengte van de wachtrij op de toerit. In praktijk zal de toeritdosering de instroom vaak niet voldoende kunnen beperken en zal een combinatie met dynamische maximumsnelheden er altijd voor zorgen dat de filegolf sneller oplost

Bij de regelschema's met toeritdosering is steeds van dezelfde verkeerssituatie uitgegaan om aan te tonen dat het inschakelen van toeritdosering ervoor kan zorgen dat filegolven sneller oplossen. De grootste winst met toeritdosering valt echter te behalen doordat files die met alleen dynamische maximumsnelheden niet op te lossen waren, nu wel oplosbaar kunnen zijn.

In Bijlage III wordt een uitgebreide beschrijving gegeven op welke manier bepaald kan worden welk regelschema van toepassing is en hoe de snijpunten van het regelschema berekend kunnen worden.

4. Methodeontwikkeling

4.1 Inleiding

Aangezien de eerste resultaten van de experimenten met dynamische maximumsnelheden in Nederland positief zijn, is te verwachten dat de maatregel in de toekomst ook op andere locaties zal worden toegepast. In dit hoofdstuk zal een mogelijke aanpak voor de bredere toepassing van dynamische maximumsnelheden worden beschreven. Uit de literatuurstudie is gebleken dat het positieve effect vooral te maken heeft met de filosofie die gebruikt wordt. De effecten zijn echter ook afhankelijk van de verkeerssituatie en de weglay-out waarbij dynamische maximumsnelheden toegepast worden. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de selectie van geschikte locaties voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden.

De doelstelling voor dit hoofdstuk is gelijk aan de hoofddoelstelling van dit onderzoek en luidt als volgt:

Doelstelling:

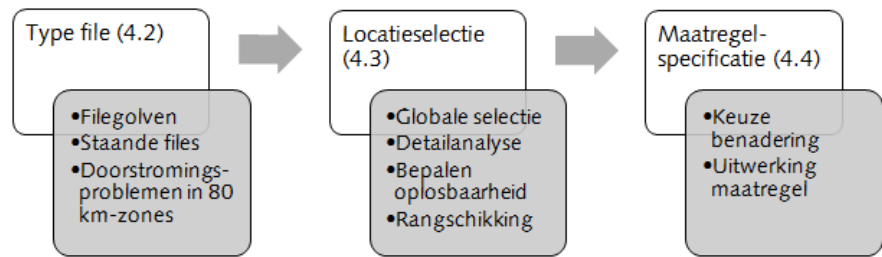
Het ontwikkelen van een methode voor de selectie van geschikte locaties voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden en waarmee de maatregel zo uitgewerkt wordt dat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt.

Om deze doelstelling te bereiken zullen de deelvragen 4-6 in dit hoofdstuk worden besproken:

4. Op basis van welke criteria kunnen geschikte locaties worden geselecteerd voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden?
5. Op welke manier kunnen dynamische maximumsnelheden toegepast worden om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren?
6. Hoe kunnen de effecten van dynamische maximumsnelheden van tevoren voorspeld worden?

In de literatuurstudie zijn verschillende problemen naar voren gekomen, waarbij dynamische maximumsnelheden effectief kunnen zijn in het verbeteren van de doorstroming. Dit zijn filegolven die zich stroomopwaarts over een traject verplaatsen, staande files bij toeritten en doorstromingsproblemen in 80 km-zones met trajectcontrole. In paragraaf 4.2 zullen deze problemen verder toegelicht worden, waarbij ingegaan wordt op de kenmerken van de verschillende typen files. Vervolgens zal er een methode beschreven worden voor de selectie van locaties en de specificatie van de maatregel om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren met dynamische maximumsnelheden. Deze methode is in Figuur 4.1 schematisch weergegeven.

Figuur 4.1: Schematische weergave methode



Voor elk type file worden locaties op een andere manier geselecteerd en zijn andere maatregelen noodzakelijk. In Paragraaf 4.3 wordt per type file beschreven hoe een globale selectie van locaties gemaakt kan worden. Door middel van een data-analyse kan vervolgens voorspeld worden op welke locaties dynamische maximumsnelheden het meest effectief kunnen zijn. Op basis hiervan kan een rangschikking gemaakt worden van geschikte locaties voor een bredere toepassing van dynamische maximumsnelheden.

In Paragraaf 4.4 zal beschreven worden hoe, afhankelijk van de locatie en het type file, een geschikte benadering gekozen kan worden uit de selectie van geschikte benaderingen uit de literatuurstudie.

4.2 Probleemomschrijving

Voordat er locaties kunnen worden geselecteerd moet er eerst vastgesteld worden voor welk type file men de doorstroming wil verbeteren. In deze paragraaf zal er daarom aandacht worden besteed aan de verschillende typen files waarbij dynamische maximumsnelheden toegepast kunnen worden. Er moet duidelijk worden wat de exacte kenmerken van de files zijn om het type file te kunnen identificeren en bij welke kenmerken dynamische maximumsnelheden gebruikt kunnen worden om de file op te lossen.

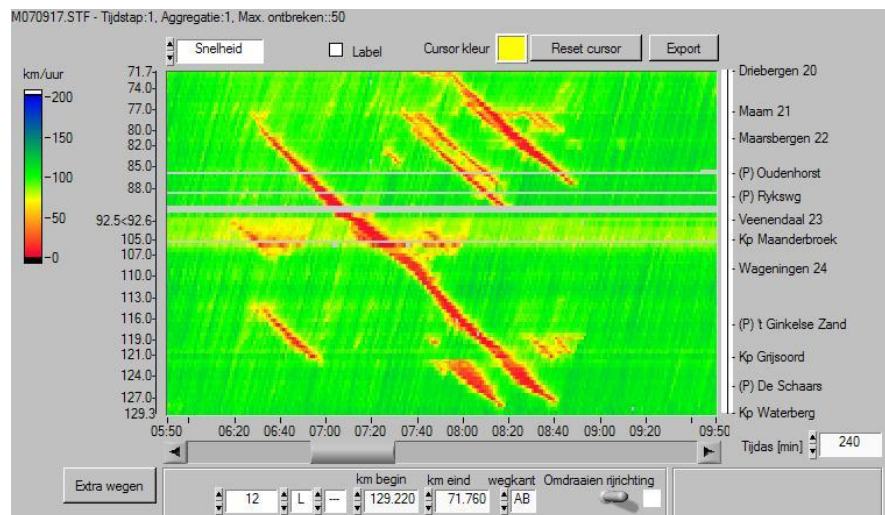
Uit de literatuurstudie is gebleken dat dynamische maximumsnelheden vooral effectief kunnen zijn in het oplossen van filegolven en staande files bij toeritten. Deze files kunnen opgelost of voorkomen worden door de instroom in het congestiegebied te beperken. De benaderingen die gebruikt kunnen worden om dit soort problemen op te lossen zijn: Distributed Controller, Specialist, MPC voor een optimale coördinatie van toeritdosering en variabele snelheidslimieten en geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten.

Een andere verkeerssituatie waarbij dynamische maximumsnelheden kunnen worden toegepast is de verslechtering van de doorstroming in 80 km-zones met trajectcontrole door homogeen rijgedrag. Deze files kunnen uitgesteld worden door de snelheid in de randen van de spits van 80 naar 100 km/u te verhogen, waardoor er meer ruimte ontstaat om de weefbewegingen te faciliteren. Hierbij zal bij de locatieselectie vooral gekeken moeten worden naar wegvakken, waarbij het weefproces door een homogene snelheid moeizaam verloopt. De enige benadering die hier op in gaat is Dynamax – A12 Voorburg. Bij de keuze van een geschikte benadering in paragraaf 4.4 zal het dan ook vooral gaan over de manier waarop de maatregel uitgewerkt moet worden.

4.2.1 Kenmerken filegolven

Filegolven ontstaan vaak bij bottlenecks waarbij vanuit de staart van de staande file een korte file (maximaal 1 à 2 km) loskomt en stroomopwaarts propageert. Hoewel deze files relatief kort zijn kunnen ze voor een lange tijd blijven bestaan, soms zelfs langer dan een uur. Er zijn ook voorbeelden waarbij de filegolf ontstaat zonder een staande file, maar wel bij een bottleneck. De verstoring creëert een groep auto's die langzaam rijden of zelfs tot stilstand zijn gekomen. Zodra de verstoring voorbij is gaat het verkeer vooraan weer rijden. Terwijl de voorste auto's wegrijden sluiten zich achter voertuigen aan. Als de weg nu zo druk is dat er precies evenveel auto's van achter aansluiten als er vooraan wegrijden, dan zal de groep wel verversen maar niet verdwijnen. Dit leidt tot een lopende filegolf: steeds nieuwe voertuigen zorgen voor een kluit langzaam rijdende voertuigen die, omdat hij van achter aangroeit en van voren oplost, zich tegen het verkeer in beweegt. Als er meer verkeer aankomt dan afrijdt, dan groeit de groep uit en wordt al lopende groter. Is het minder, dan lost hij al lopende op. De kop van deze filegolven propageert doorgaans met een constante snelheid van -18 km/u.

Figuur 4.2: Voorbeeld lopende filegolven (Transpute, 2008)



Redenen om optreden filegolven te bestrijden zijn:

- Het confronteert vrij rijdend verkeer plotseling met fileverkeer op onverwachte plekken, het is dus onveilig;
- Het vergroot de kans op nieuwe incidenten en dus grote vertragingen;
- De afrijcapaciteit van filegolven is ongeveer 70% van de vrije capaciteit van de snelweg. Dit leidt tot onderbenutting van de snelweg over het hele traject waarover de filegolf propageert;
- Extra vertraging voor alle voertuigen die door de filegolf heen moeten, ook voor voertuigen die niet door de werkelijke bottleneck gaan;
- Extra verstoring in het verkeer die andere files kan triggeren, bijvoorbeeld bij toeritten.

4.2.2 Kenmerken staande files bij toeritten

Als de intensiteit vanaf de toerit te groot is kunnen er ter hoogte van de toerit files ontstaan. Er ontstaat dan een file met een vaste kop die zich stroomopwaarts verplaatst. Door het invoegen ontstaat een snelheidsverlaging op de hoofdrijbaan en door het harmonica-effect moet het aankomende verkeer voor de invoeging steeds iets harder remmen en daarna noodgedwongen nog iets harder. De voertuigen daarna nog harder en uiteindelijk staat het verkeer stil. Als de hoeveelheid invoegend verkeer afneemt, zal een dergelijke file van voren af aan weer beginnen met rijden, terwijl achteraan nog steeds voertuigen aansluiten in de file. Een dergelijke file golft als het ware stroomopwaarts. Als even later opnieuw auto's willen invoegen bij de toerit ontstaat opnieuw filevorming en een nieuwe filegolf.

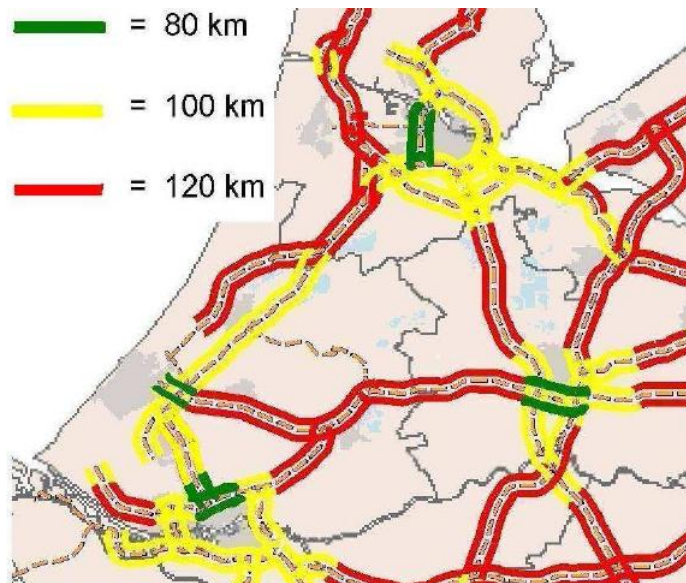
De capaciteitsval die ontstaat door files bij toeritten verschilt van de waarde van de capaciteitsval bij filegolven en kan variëren tussen -1 en -15 procent (Hoogendoorn, 2007). Bij filegolven is de capaciteitsval -30 procent. Naar de reden van dit verschil zal meer onderzoek gedaan moeten worden.

Eén van de redenen om files bij toeritten te bestrijden is om te voorkomen dat het verkeer op de hoofdrijbaan vertraging oploopt, door hoge intensiteiten op de toerit. De rembewegingen ter hoogte van de toerit kunnen verder voor onveilige situaties zorgen, wat de kans op incidenten vergroot. De staande files kunnen filegolven triggeren die ervoor zorgen dat ook voertuigen die niet door de werkelijke bottleneck hoeven vertraging oplopen.

4.2.3 Kenmerken doorstromingsproblemen 80 km-zones

Eén van de maatregelen om de jaargemiddelde concentraties NO₂ nabij autosnelwegen te verminderen, is het verlagen van de maximumsnelheid naar 80 km/u in combinatie met trajectcontrole om de snelheid te handhaven. Het primaire doel van de 80 km/u maatregel is de verbetering van de lokale luchtkwaliteit. Daarnaast heeft de maatregel effecten op de geluidsoverlast, de verkeersveiligheid en de verkeersafwikkeling. In Figuur 4.3 zijn de huidige 80 km-zones weergegeven.

Figuur 4.3: Locaties 80 km-zones



Als gevolg van de 80 km zones met trajectcontrole is de doorstroming op sommige maatregelvakken verslechterd en daarmee samenhangend in filezwaarte toegenomen. Onderzoek (Harms, 2006) heeft aangetoond dat de verlaging van de maximumsnelheid van 100 naar 80 km/u op zichzelf niet de oorzaak is van de veranderingen in de verkeerssituatie. Maar de daling van de capaciteit, die is geconstateerd na invoering van de maatregel, wordt veroorzaakt door de veranderingen in het rijgedrag van de weggebruikers als gevolg van de snelheidsverlaging in combinatie met trajectcontrole.

Indien de maatgevende bottleneck zich binnen het maatregelvak bevindt, is de capaciteit significant gedaald op wegvakken waar de maatregel van kracht is. Verder is aangetoond dat zodra er hoge intensiteiten worden bereikt de verkeersstroom na invoering van de maatregel sneller omslaat in congestie.

De drie voornaamste oorzaken voor afname van de capaciteit en dus de toename van de filezwaarte zijn de verandering in het gebruik van de rijstroken, de rembewegingen ter hoogte van weefvakken en invoegingen en de afname van de capaciteitssnelheid.

Door de afname van het snelheidsverschil tussen de rijstroken onderling is de wens van de bestuurders om van rijstrook te wisselen gedaald. Hierdoor is de hoeveelheid verkeer op de rechterrijstrook toegenomen en wordt de linkerrijstrook minder optimaal benut. Er worden korte volgtijden op de rechterrijstrook waargenomen, waardoor eerder hoge dichtheden worden bereikt bij gelijke intensiteiten van de gehele rijbaan. Het verkeer vertraagt dus eerst op de rechterrijstrook, terwijl er op de linkerrijstrook nog geen kritieke dichtheden worden bereikt. De gemiddelde snelheid van de rijbaan gaat hierdoor wel naar beneden en het verkeersbeeld slaat om naar congestie.

De toename van het verkeer op de rechterrijstrook en de afname van de dynamiek in het verkeer heeft er ter hoogte van weefvakken en

invoegingen met hoge intensiteiten voor gezorgd dat de weefbewegingen minder soepel verlopen. Vanwege de trajectcontrole zijn de bestuurders bang om de snelheidslimiet van 80 km/u te overschrijden, waardoor ze voornamelijk remgedrag vertonen om een geschikt hiaat te creëren of te vinden. Hierdoor ligt de snelheid op het weefvak en stroomopwaarts substantieel lager.

De optimale snelheidslimiet ligt hoger dan de maximale snelheid na invoering van de maatregel, waardoor de optimale snelheid niet meer kan worden bereikt na invoering van de maatregel. De volgafstanden tijdens vrije doorstroming zijn na invoering van de maatregel afgenomen, waardoor er hogere dichtheden worden bereikt voordat er congestie ontstaat. Doordat de gemiddelde snelheid op dat moment lager is dan in de voorsituatie is de capaciteit niet toegenomen. De volgafstanden tijdens congestie zijn echter gestegen, waardoor het langer duurt voordat de file oplost en de lengte van de file bij een gelijk blijvend aantal voertuigen is toegenomen.

4.3 Locatieselectie

In deze paragraaf zal ingegaan worden op welke manier locaties geselecteerd kunnen worden op basis van de typen files die in paragraaf 4.2 zijn beschreven. Eerst zal er een globale selectie gemaakt worden van locaties. Voor de verschillende typen files zal dit op een andere manier gebeuren. Vervolgens zal er in meer detail naar de locaties gekeken worden die uit deze selectie komen. De detailanalyse bestaat uit de identificatie van de verschillende typen files waarna vervolgens de oplosbaarheid of mate van uitstel van de file bepaald wordt. De mate waarin dynamische maximumsnelheden het aantal voertuigverliesuren kan beperken zal meegenomen worden in de rangschikking van locaties.

4.3.1 Globale selectie van locaties

Voor de problemen filegolven, staande files bij toeritten en doorstromingsproblemen in 80 km zones zal beschreven worden hoe men vast kan stellen welke locaties in eerste instantie in aanmerking komen voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden. Om een representatief overzicht te krijgen van locaties moet er van meerdere dagen data beschikbaar zijn.

Filegolven

Doordat filegolven relatief korte files zijn worden deze files vaak niet meegenomen in de fileregistratie. Deze files beperken echter wel de doorstroming, waardoor het belangrijk is om te weten waar deze filegolven optreden.

Een manier waarop locaties kunnen worden geselecteerd is op basis van de verhouding tussen de capaciteit en de intensiteit (i/c verhouding). Er kan hierbij gebruik gemaakt worden van de INWEVA⁴-database, waarin gegevens staan over de wegvakintensiteiten tussen knooppunten in het Nederlandse snelwegennetwerk.

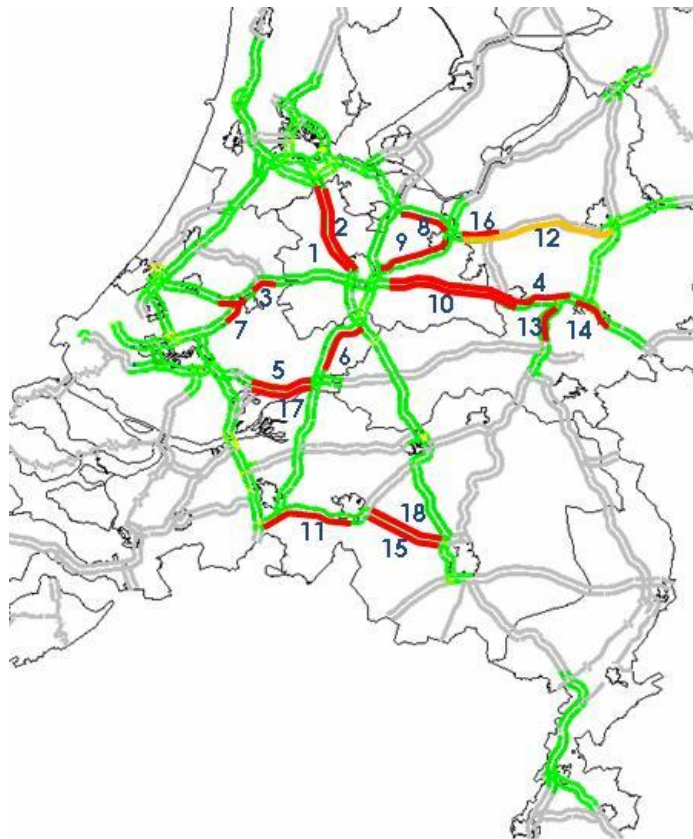
⁴ INSchatten WEgVAkintensiteiten

De i/c verhouding waarbij de kans op het ontstaan van filegolven groot is, is gelijk aan 0,7. In een onderzoek van Hegyi et al. (2007) is er gebruik gemaakt van deze methode om trajecten te van ten minste negen kilometer te selecteren. Voor de lengte van een traject is getracht om een zo lang mogelijk traject te vinden zonder op- en afritten. Op basis van i/c verhouding zijn hierbij de volgende trajecten geselecteerd:

1. A1 Hoevelaken - Barneveld, km 45,3-54,4
2. A1 Kootwijk - Hoenderloo, km 69,7-79,5
3. A4 Zoeterwoude-Dorp - Leidschendam, km 35,0-44,2
4. A12 Maarsbergen - Veenendaal, km 80,9-91,7
5. A12 Wageningen - Oosterbeek, km 109,2-119,7
6. A50 Schaarsbergen - Hoenderloo, km 184,9-194,1
7. A58 Oirschot - Moergestel, km 20,6-29,8

Ook Transpute heeft onderzoek naar locaties waar regelmatig filegolven optreden gedaan. In 2008 is er een korte inventarisatie op filegolven gemaakt van alle autosnelwegen voorzien van signalering, waarbij is gekeken naar alle werkdagen in de periode 29 oktober 2007 tot en met 5 november 2007. Van de in totaal circa 1.100 kilometer weglengte met signalering, zijn er 270 kilometer (=24%) gevonden waar regelmatig filegolven voorkomen. De toplocaties zijn de A2 tussen knooppunt Holendrecht en Oudenrijn in beide richtingen. In Figuur 4.4 zijn deze locaties weergegeven. Trajectnummer 12 (A1R kp. Hoevelaken – kp. Beekbergen) is een speciaal geval. De in totaal 10 gevonden filegolven op dit traject ontstonden allen op dezelfde dag, dus het is de vraag of de gekozen periode voor dit traject een representatief gemiddelde heeft opgeleverd.

.....
Figuur 4.4: Filegolflocaties op wegen met signalering (Transpute, 2008)



Voor de selectie van locaties waar filegolven optreden wordt de voorkeur gegeven aan de methode waarbij gebruik gemaakt wordt van i/c verhoudingen. In tegenstelling tot het onderzoek van Hegyi et al. (2007) kunnen hierbij wel trajecten met op- en afritten meegenomen worden, omdat er verschillende benaderingen zijn waarbij dynamische maximumsnelheden worden gecombineerd met toeritdosering. Hoewel deze methode nog geen zekerheid geeft van het optreden van filegolven is het effectiever dan de methode van Transpute, omdat hier gelijk in detail naar de trajecten gekeken wordt, wat erg tijdrovend is. In de toekomst zal het echter mogelijk worden om trajecten snel in detail te analyseren. Rijkswaterstaat is momenteel bezig met de ontwikkeling van VIA (Verkeerskundige Informatie en Advies), waarin statistische verkeersgegevens per minuut worden verzameld. Als filegolven hiermee direct geïdentificeerd kunnen worden kan de globale selectie verbeterd worden.

Staande files bij toeritten

De meeste staande files bij toeritten zijn wel uit de fileregistratie te halen door de focussen op de locatie waar ze ontstaan. Bij toeritten waar er door wisselende intensiteiten op het ene moment wel en op het andere moment geen file staat kan er gefocust worden op de frequentie van files. Doordat toeritten vaak een bottleneck voor het verkeer vormen, ontstaan er veel files bij toeritten. Deze selectiemethode zal waarschijnlijk dan ook een groot aantal locaties opleveren.

Aangezien dynamische maximumsnelheden nog niet in de praktijk gebruikt worden om staande files op te lossen, zal eerst meer onderzoek gedaan moeten worden bij welke kenmerken de files

oplosbaar zijn. Er kan vervolgens bijvoorbeeld op basis van een maximale filelengte een globale selectie van locaties gemaakt worden met staande files waar dynamische maximumsnelheden toegepast kunnen worden. De verwachting is dat dynamische maximumsnelheden vooral effectief kunnen zijn op locaties waar op het ene moment wel en op het andere moment geen file staat. Hier moet dan ook de nadruk op komen te liggen bij de selectie van locaties.

Doorstromingsproblemen 80 km-zones

Voor de globale selectie van trajecten die in aanmerking komen voor een dynamische maximumsnelheid zal er vooral gekeken worden naar de huidige 80 km zones in combinatie met trajectcontrole, waarin zich een maatgevende bottleneck bevindt. Hierbij kan gedacht worden aan bottlenecks zoals complexe weefvakken. Na invoering van de 80 km/u-maatregel slaat de verkeersstroom al bij lagere intensiteiten om in congestie en kan de verkeersstroom in de middaguren niet volledig herstellen waardoor de capaciteit lager ligt.

Van de 80 km-zones die nu aanwezig zijn in Nederland zijn deze problemen geconstateerd op de A20 bij Rotterdam en de A12 bij Voorburg. Op deze wegvakken is een capaciteitsafname waargenomen na invoering van de 80 km/u maatregel. In het Dynamax project wordt al geëxperimenteerd op de A12 bij Voorburg met een snelheidsverhoging naar 100 km/u in de randen van de spits. In het najaar van 2010 zal er ook een proef op de noordbaan van de A20 bij Rotterdam starten.

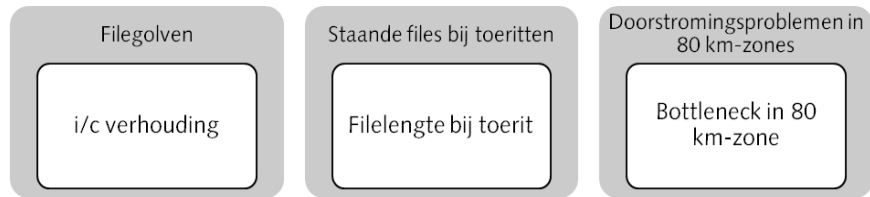
Voor de toekomstige invoering van 80 km-zones moet er opgelet worden dat de maatregel niet toegepast wordt op trajecten met complexe weefvakken en invoegingen die tevens een bottleneck vormen. Als de wenselijkheid van het invoeren van de maatregel onderzocht wordt moet de huidige verkeersafwikkeling bekeken worden. Indien de bottleneck in het maatregelvlak ligt en de optimale snelheid hoger is dan de nieuwe snelheidslimiet van 80 km/u is het niet verstandig om de maatregel op deze locatie in te voeren met het oog op de verwachte toename in de filezwaarte. Het is echter wel mogelijk om de maatregel toe te passen in combinatie met dynamische maximumsnelheden. Op minder kritieke momenten voor de doorstroming kan de snelheid van 80 km/u gehanteerd worden om de maximale winst voor de luchtkwaliteit te behalen.

In verband met het Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit (NSL) komen de volgende trajecten in aanmerking voor een snelheidsverlaging met strikte handhaving:

- A2 HR (links) bij Geldermalsen, hm 82,9-83,8, in totaal 901 meter;
- A2 HR (links) bij Neerijnen, hm 95,4-0,0, in totaal 1048 meter;
- A27 HR (links) bij Vianen, hm 52,2-55,6, in totaal 3029 meter;
- A16 VBR (links) bij Rotterdam-IJsselmonde, hm 23,0-23,9, in totaal 949 meter;
- A27 HR (rechts) bij Gorinchem, hm 37,3-38,8, 2 kortere delen van in totaal 811 meter.

In Figuur 4.5 is de globale selectie voor de verschillende type files samengevat.

Figuur 4.5: Schematische weergave globale selectie van locaties voor verschillende typen files



4.3.2 Detailanalyse van geselecteerde locaties

Figuur 4.6: Schematische weergave detailanalyse



Na een globale selectie van locaties kan er in meer detail gekeken worden naar de locaties om te weten te komen of de specifieke problemen optreden. In Figuur 4.6 is de detailanalyse schematisch weergegeven. Met behulp van Monigraph kan MoniCa⁵- of MoniBAS⁶-data ingelezen worden, verwerkt en gevisualiseerd worden. MoniCa levert lusgegevens (intensiteiten en snelheden) op rijstrookniveau terwijl MoniBAS deze gegevens bewerkt tot meetvkniveau. Verder kunnen met Monigraph prestatie-indicatoren zoals reistijden, trajectsnelheden,

voertuigkilometers, voertuigverliesuren en snelheidscontourplots worden berekend.

Om een representatief beeld van de verkeerssituaties te krijgen moet er naar meerdere dagen worden gekeken.

In deze paragraaf wordt voor de verschillende typen files beschreven op basis van welke criteria de files geïdentificeerd kunnen worden. Ook wordt per type file beschreven welke indicatoren vastgesteld moeten worden om de oplosbaarheid of mogelijke uitstel vast te kunnen stellen en de mogelijke winst in voertuigverliesuren te kunnen bepalen.

Filegolven

Voor de identificatie van filegolven kan gebruik gemaakt worden van Matlab, waarbij per tijdstap en detectielus gecontroleerd wordt of er een filegolf aanwezig is. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende criteria:

- De snelheid in de filegolf is lager of gelijk aan 50 km/u;
- De intensiteit in de filegolf is lager of gelijk aan 1500 vtg/uur/strook;
- De kop van de filegolf propageert tegen de rijrichting in met een snelheid tussen de -15 en -23 km/u.

Om te voorkomen dat een filegolf als twee filegolven wordt geïdentificeerd kan een kleine onderbreking in ruimte (1,5 km) en tijd (5 min.) worden toegestaan.

Na de identificatie van de filegolf kunnen per tijdstap de gemiddelde verkeers toestanden in en rondom de filegolf worden bepaald. Dit is de input voor het bepalen van de oplosbaarheid. De manier waarop de

⁵ MONitoring CA sco

⁶ MONitoring BASisapplicaties

oplosbaarheid bepaald kan worden, wordt beschreven in paragraaf 4.3.3.

Verder kan er naar de locatie worden gekeken waar regelmatig filegolven optreden en de frequentie waarmee dat gebeurt. Door naar het bereik en de duur van de file te kijken, kan er bepaald worden hoe lang het duurt voordat de filegolf uitdooft en over welke afstand de filegolf zich verplaatst heeft. De verplaatsingssnelheid van de filegolf kan berekend worden door het bereik te delen door de duur van de filegolf. Verder kan de gemiddelde lengte van de file bepaald worden. De lengte van filegolven is maximaal 1 à 2 km. Ook kan het aantal voertuigverliesuren bepaald worden. Dit geeft het verschil in totale reistijd ten opzichte van vrije afwikkeling en is een goede indicator om verschillende files met elkaar te kunnen vergelijken.

Staande files bij toeritten

Vergelijkbaar met filegolven moeten er drempelwaarden voor de intensiteit en snelheid vastgesteld worden op basis waarvan staande files kunnen worden geïdentificeerd. De snelheden in een staande file zullen echter hoger liggen dan in een filegolf en ook is de capaciteitsval anders. Om deze drempelwaarden vast te stellen zal in meer detail naar de staande files gekeken moeten worden.

Nadat de staande file is geïdentificeerd kunnen, vergelijkbaar met filegolven, per tijdstap de gemiddelde verkeersstanden in en rondom de file berekend worden. Dit is noodzakelijk om de oplosbaarheid te kunnen bepalen. Niet alleen de intensiteiten op de hoofdrijbaan, maar ook op de toerit moeten bekend zijn om te bepalen hoeveel winst er met toeritdosering behaald kan worden. In paragraaf 4.3.3 zal verder ingegaan worden op de manier waarop de oplosbaarheid van staande files bepaald kan worden.

Verder kan vastgesteld worden wat het bereik en duur van de file is. Hiermee kan bepaald worden welk verkeer er door de file gehinderd wordt. Ook hier moet het aantal voertuigverliesuren bepaald worden.

Doorstromingsproblemen in 80 km-zones

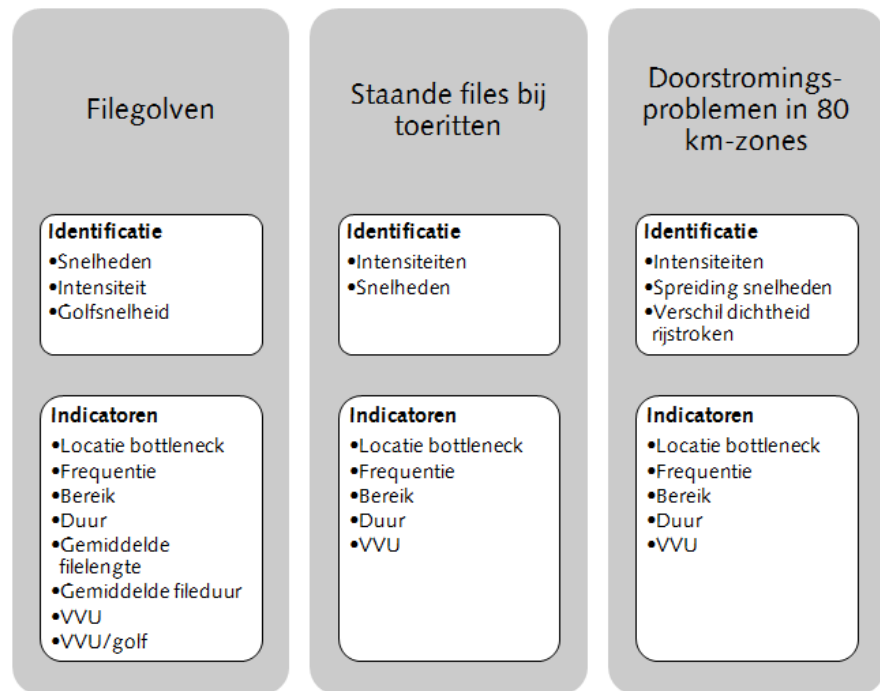
Doorstromingsproblemen in 80 km-zones kunnen geïdentificeerd worden door in de data te kijken naar de spreiding van de snelheden over het gehele traject waarover de 80 km/u maatregel in combinatie met trajectcontrole aanwezig is. Door homogeen rijgedrag is de spreiding in snelheid erg klein. Ook zal de dichtheid op de rechterrijstrook hoger liggen, waardoor hier als eerste file ontstaat en ontstaat er in vergelijking tot de situatie zonder 80 km/u maatregel bij lagere intensiteiten file.

Om de mogelijke uitstel van congestie te kunnen bepalen moet ook naar de situatie gekeken worden waarbij een snelheidslimiet van 100 km/u geldt. Over het algemeen zal de spreiding van snelheden ten opzichte van de situatie met 100 km/u zijn afgenomen en ligt de gemiddelde snelheid lager dan 80 km/u door de combinatie met trajectcontrole. Verder is het nuttig om te kijken naar de kritische snelheid in de situatie zonder 80 km/u maatregel. Als deze snelheid hoger ligt dan 80 km/u is dit één van de oorzaken van het eerder ontstaan van congestie en de langere oplostijd van congestie.

Ook kan er gekeken worden naar de locatie van de bottleneck, zoals een weefvak of een invoegstrook, het bereik, de duur en het aantal voertuigverliesuren dat veroorzaakt wordt door de doorstromingsproblemen. In paragraaf 4.3.3 zal dieper ingegaan worden op de manier waarop de mate van uitstel van congestie in 80 km-zones kan worden bepaald.

In Figuur 4.7 is per type file samengevat op basis waarvan de file kan worden geïdentificeerd en welke indicatoren vervolgens noodzakelijk zijn om de oplosbaarheid te kunnen bepalen.

Figuur 4.7: Samenvatting van identificatie per type file en benodigde indicatoren voor het bepalen van de oplosbaarheid.



Door Rijkswaterstaat wordt het aantal voertuigverliesuren (VVU) als volgt berekend:

$$VVU = RTV * d_i * I * t$$

Waarbij:

VVU = voertuigverliesuren (voertuig * uur)

RTV = rijtijdverlies (uur/km)

d_i = afstand tussen de betreffende meetlussen (km)

I = intensiteit (voertuig/uur)

t = tijd waarover de intensiteit gemeten is (uur)

En:

$$RTV = \frac{1}{V_{\text{werkelijk}}} - \frac{1}{V_{\text{norm}}}$$

Waarbij:

$V_{\text{werkelijk}}$ = werkelijk gereden snelheid

V_{norm} = normsnelheid/vergelijkingssnelheid

De vergelijkingssnelheid wordt op 100 km/u gesteld. Bij een werkelijke snelheid van meer dan 100 km/u ontstaan geen voertuigwinsturen. In filegolven liggen de snelheden echter zo laag dat deze niet nauwkeurig kunnen worden gemeten. Daarom kan bij filegolven de snelheid beter afgeleid worden van de toestand stroomafwaarts van de filegolf, de intensiteit in de filegolf en de golfsnelheid van ca. -18 km/u. Een andere manier om het aantal voertuigverliesuren te bepalen is op basis van verschil in dichtheid ten opzichte van vrije afwikkeling. In vrije afwikkeling wordt de dichtheid per strook geschat op 20 vtg/km. Het verschil met de dichtheid in de filegolf moet per tijdstap worden vermenigvuldigd met de lengte van de filegolf.

4.3.3 Beoordeling oplosbaarheid of mogelijke uitstel van files

Door te kijken naar in welke mate de verschillende files op te lossen of uit te stellen zijn kan er een rangschikking gemaakt worden van locaties waarbij met dynamische maximumsnelheden in de praktijk de meeste winst valt te behalen. Hierdoor kan er zonder dat de maatregel volledig uitgewerkt wordt een schatting gemaakt worden van de winst in voertuigverliesuren.

Figuur 4.8: Schematische weergave bepaling oplosbaarheid



Om de oplosbaarheid te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van de berekende indicatoren uit Paragraaf 4.3.2. Verder zijn de gekozen parameters van belang. Hierbij kan gedacht worden aan de hoogte van de snelheidslimiet, de doseringsgraad van de toeritdosering en parameters van het algoritme.

Vervolgens kan de oplosbaarheid van de verschillende typen files worden bepaald, waarna de winst in voertuigverliesuren geschat kan worden. Op basis hiervan kan een rangschikking van de trajecten

gemaakt worden. De opeenvolgende stappen zijn weergegeven in Figuur 4.8.

Bij filegolven en staande files bij toeritten bepaalt de mate waarin de instroom beperkt wordt grotendeels de oplosbaarheid. De instroom kan beperkt worden met dynamische maximumsnelheden al dan niet gecombineerd met toeritdosering op locaties waar de intensiteiten op de toerit te hoog zijn.

Bij doorstromingsproblemen in 80 km-zones gaat het erom in welke mate een snelheidsverhoging bij kan dragen aan het uitstellen en eventueel sneller oplossen van de file. Hierbij wordt uitgegaan van een snelheidsverhoging naar 100 km/u.

In deze paragraaf wordt voor de verschillende typen files beschreven van welke uitgangspunten gebruikt gemaakt wordt om de oplosbaarheid te bepalen.

Filegolven en staande files bij toeritten

Voor het beperken van de instroom in een filegolf of staande file bij een toerit kunnen dynamische maximumsnelheden, toeritdosering of een combinatie van beide toegepast worden. Bij de toepassing van dynamische maximumsnelheden moet voor elke op te lossen file een vaste waarde voor de snelheidslimiet gekozen worden die in ieder geval lager is dan de gereden snelheid, zodat de instroom voldoende beperkt kan worden. Er moet hierbij gebruik gemaakt worden van de effectieve snelheidslimiet, de verwachte rijsnelheid van de weggebruikers. Als er toeritdosering toegepast wordt om de instroom in het congestiegebied te beperken, wordt er uitgegaan van een vaste doseringsgraad. Er wordt hierbij geen rekening gehouden met de lengte van de wachtrij op de toerit. In werkelijkheid zal er echter een limiet in opstelruimte op de toerit zijn. Door deze aanname te doen is de oplosbaarheid echter eenvoudiger te bepalen en zal de winst in voertuigverliesuren ook hoger uitvallen dan in werkelijkheid. In de praktijk kan de file mogelijk minder snel opgelost worden, doordat de instroom vanaf de toerit mogelijk hoger is in verband met de beperkte opstelruimte en ook het aantal voertuigverliesuren op de toerit moet worden meegenomen. De oplosbaarheid kan tevens afhankelijk zijn van de meetvertraging waarmee de dynamische maximumsnelheden of toeritdosering ingeschakeld wordt. De meetvertraging is afhankelijk van de manier waarop de lusdata verwerkt wordt en het algoritme dat gebruikt wordt en kan van tevoren niet exact bepaald worden. Bij het bepalen van de oplosbaarheid wordt er vanuit gegaan dat er geen voorspellende benadering wordt gebruikt en kan de meetvertraging worden verwaarloosd.

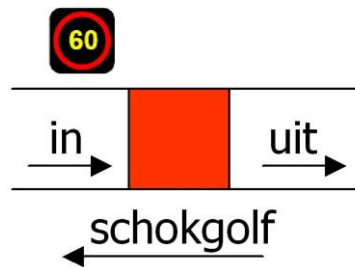
Voor elke filegolf kan aan de hand van de regeling die beschreven is in paragraaf 3.4 en bijlage III worden bepaald of de filegolf oplosbaar is. Deze berekeningen zijn geïmplementeerd in Matlab en moeten leiden tot het procentuele aantal files op een traject wat oplosbaar is en de mogelijke winst in voertuigverliesuren.

Voor staande files kan in principe dezelfde controle worden uitgevoerd. Het verschil bij staande files is dat de kop van de file op dezelfde locatie blijft. Ook zijn de toestanden rondom en in de file anders en is de winst die er te behalen valt afhankelijk van de capaciteitsval.

Voor het bepalen van de oplosbaarheid van filegolven en staande files is de werkelijkheid vereenvoudigd tot drie mogelijke scenario's. Voor deze scenario's zal beschreven worden welke regeling uit Bijlage III van toepassing is.

1. Een filegolf die "ver" stroomafwaarts van een toerit opgelost kan worden;

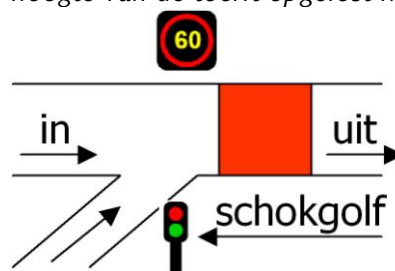
Figuur 4.9: Scenario 1



Hiervoor kunnen dynamische maximumsnelheden worden toegepast om de oplosbaarheid van de filegolf te bepalen. In Bijlage III-a staat de regeling beschreven, waarbij geen rekening gehouden hoeft te worden met een toerit.

2. Een filegolf die stroomafwaarts van een toerit ontstaat en ter hoogte van de toerit opgelost kan worden;

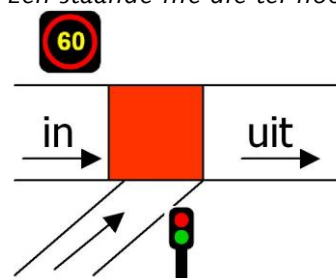
Figuur 4.10: Scenario 2



De instroom kan ter hoogte van een toerit beperkt worden met dynamische maximumsnelheden gecombineerd met toeritdosering. Door beide maatregelen gecombineerd in te zetten zal de filegolf sneller oplossen. Het inschakelen van de toeritdosering is afhankelijk van de afstand van de staart van de filegolf tot de toerit en de benodigde lengte van de ingreep. (Bij het Specialist-algoritme was de gemiddelde lengte van de ingreep 4,4 km met een standaarddeviatie van 4,3 km) Het regelschema dat toegepast moet worden is afhankelijk van de afstand van de filegolf tot de toerit. Mogelijke regelschema's worden beschreven in Bijlage III-b, c, d en e.

3. Een staande file die ter hoogte van een toerit ontstaat;

Figuur 4.11: Scenario 3



Wanneer er ter hoogte van een toerit een staande file ontstaat, kunnen dynamische maximumsnelheden en toeritdosering gebruikt worden om de file op te lossen.

De oplosbaarheid in dit scenario verschilt van scenario 2, omdat de capaciteitsval bij dit type file anders is. Bij een capaciteitsval van 10% mag de totale instroom vanaf de hoofdrijbaan en toerit maximaal 90% van de capaciteit in vrije afwikkeling zijn.

Om de effectiviteit van toeritdosering te kunnen bepalen moet duidelijk worden wat de verschillen van de toestand in de file stroomopwaarts en stroomafwaarts van de toerit zijn.

Vervolgens kan het aantal voertuigverliesuren in de situatie zonder dynamische maximumsnelheden vergeleken worden met de situatie waarbij wel dynamische maximumsnelheden worden toegepast. Hierbij wordt alleen gekeken naar het aantal voertuigverliesuren op de hoofdrijbaan. Omdat het hier om een schatting gaat is het voldoende om alleen te kijken naar het aantal voertuigverliesuren in de filegolf en niet naar de voertuigverliesuren die veroorzaakt worden door de dynamische maximumsnelheden.

Doorstromingsproblemen 80 km-zones

Bij dit probleem gaat het er niet om of de files op te lossen zijn, maar of de file voldoende uitgesteld kan worden zodat het aantal voertuigverliesuren zoveel mogelijk beperkt kan worden. Door een snelheidsverhoging van 80 naar 100 km/u in de randen van de spits toe te passen kan het ontstaan van congestie worden uitgesteld en zal de verkeersstoestand na het oplossen van congestie eerder herstellen. De verhoging van de snelheid van 80 naar 100 km/u moet ervoor zorgen dat de spreiding in snelheden groter zal worden. Dit heeft te maken met het feit dat een deel van de weggebruikers, zoals vrachtwagens niet harder mogen dan 80 km/u. Hierdoor worden de intensiteiten beter over de rijstroken verdeeld en moet het weefproces makkelijker verlopen.

De winst in voertuigverliesuren kan bepaald worden door de situaties 100 km/u en 80 km/u met trajectcontrole met elkaar te vergelijken. Op basis van historische data en de resultaten van de proef op de A12 bij Voorburg kan vervolgens bepaald worden in welke mate de file uitgesteld wordt door een tijdelijke snelheidsverhoging.

Ook in de nachtelijke uren kan de verhoging van de maximumsnelheid zorgen voor een kortere reistijd. De snelheidsverhoging in de randen van de spits heeft echter een groter effect op het aantal voertuigverliesuren. Hier zal dan ook de nadruk op moeten komen te liggen.

4.3.4 Rangschikking van locaties

In de huidige selectie van trajecten voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden wordt vaak gebruik gemaakt van het aantal voertuigverliesuren op dat traject. Er wordt hierbij niet gekeken naar de kenmerken van de files en of deze files ook oplosbaar zijn met dynamische maximumsnelheden. In deze methode wordt van tevoren een inschatting gemaakt in welke mate de files op te lossen of uit te stellen zijn en hoeveel winst er in voertuigverliesuren te behalen valt. Op basis van het procentueel aantal oplosbare files en de winst in voertuigverliesuren wordt er een rangschikking gemaakt van meest geschikte locaties.

4.4 Maatregelspecificatie

Nadat er geschikte locaties zijn geselecteerd moet er een specifieke benadering gekozen worden en kan de maatregel verder uitgewerkt worden. In principe is vooral de regelfilosofie belangrijk voor het effect van de maatregel. Voor het oplossen van filegolven en staande files bij toeritten zijn verschillende benaderingen mogelijk. Dit zijn Distributed Controller, Specialist, MPC voor een optimale coördinatie van toeritdosering en variabele snelheidslimieten en geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten. Afhankelijk van de weglay-out of verkeerssituatie is echter niet elke maatregel geschikt om toegepast te worden. Voor doorstromingsproblemen in 80 km-zones zijn er geen verschillende maatregelen mogelijk, zoals besproken in de literatuurstudie. Hierbij wordt altijd een snelheidsverhoging van 80 naar 100 km/u toegepast.

Vervolgens wordt beschreven hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden, waarbij gebruik gemaakt kan worden van de resultaten uit de locatieselectie. Voor een traject met veel toe- en afritten zal een combinatie van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering noodzakelijk zijn. Naast de benaderingen uit de literatuurstudie kan hierbij ook gebruik gemaakt worden van de regeling die ontwikkeld is in paragraaf 3.4.

Deze maatregelspecificatie is vooral bedoeld als een eerste stap in de uitwerking van de maatregel. Voordat de maatregel in de praktijk kan worden toegepast is een simulatiestudie of praktijktest noodzakelijk om bijvoorbeeld de parameters in een algoritme goed af te kunnen stellen.

4.4.1 Keuze benadering

De keuze voor een specifieke benadering is onder andere afhankelijk van de grootte van het netwerk en de lay-out van de weg. In principe zijn alle benaderingen die als beste uit de beoordeling kwamen in de literatuurstudie geschikt om de doorstroming te verbeteren. Sommige benaderingen, zoals MPC kunnen naast het oplossen van file ook het ontstaan van file voorkomen. Door de voorspellingen die gedaan worden, neemt de rekentijd echter toe. Het netwerk waarover dit algoritme wordt toegepast moet daarom niet te groot zijn. Hoe langer het traject, hoe groter de meetvertraging, waardoor het algoritme minder effectief wordt in het oplossen van filegolven of files bij toeritten. Er kan dan beter voor een benadering gekozen worden die minder rekenintensief is, zoals Specialist of een distributed controller. De benadering met MPC houdt ook rekening met de aanwezigheid van toeritten. Dit is niet het geval bij Specialist en distributed controller. In eerste instantie zijn deze benaderingen dan ook beter geschikt voor trajecten, waarop zich geen op- en afritten bevinden met hoge intensiteiten. Als de hoeveelheid verkeer op de toerit groter is en het een lang traject is, kunnen de algoritmen Specialist en distributed controller ook aangepast worden door dynamische maximumsnelheden te combineren met toeritdosering. Een voorbeeld van de manier waarop het algoritme aangepast kan worden is beschreven in paragraaf 3.4.

4.4.2 Uitwerking

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven voor de uitwerking van een maatregel. Hierbij komen specificaties zoals de lengte van het traject, de aanpassing van het algoritme, de effectieve snelheidslimiet, het gebruik van toeritdosering, de keuze van drempelwaarden en de samenwerking met de AID aan bod.

Lengte traject

Voor de lengte van het traject moet gekeken worden naar de afstand waarover de file zich verplaatst en het traject dat nodig is om de file op te lossen. De lengte waarover dynamische maximumsnelheden moeten worden toegepast is afhankelijk van de verkeerssituatie in en rond de file en de opvolging van de aangepaste snelheden door de weggebruiker. De optimale lengte vanuit gebruikers oogpunt dient van knooppunt tot knooppunt te verlopen. De optimale verkeerskundige versie loopt vanaf de dichtstbijzijnde afrit/oprit/knooppunt die bij de originele hectometrering is gegeven naar de dichtstbijzijnde afrit/oprit/knooppunt die overeenstemt met de gegeven hectometers.

Effectieve snelheid

De effectieve snelheid is afhankelijk van de mate van handhaving. Een lagere snelheid zonder strikte handhaving kan hetzelfde effect hebben als een hogere snelheid met strikte handhaving. Hoe lager de snelheid, hoe meer de instroom beperkt wordt en hoe sneller de file oplost. De effectieve snelheid moet in ieder geval lager liggen dan de kritische snelheid, omdat het anders geen effect heeft. De oplosbaarheid wordt mede bepaald door de waarde van de effectieve snelheidslimiet. In 80 km-zones wordt de snelheid tijdelijk verhoogd naar 100 km/u. Uit de resultaten van de proef op de A12 bij Voorburg bleek echter dat de gemiddelde snelheid in werkelijkheid lager ligt. Hier kan rekening mee gehouden worden bij het voorspellen van de effecten van de maatregel.

Toeritdosering

Uit de intensiteiten op de toeritten moet blijken of het noodzakelijk is om dynamische maximumsnelheden te combineren met toeritdosering. Voor de toepassing van toeritdosering in de praktijk wordt aanbevolen om gebruik te maken van informatie van een detectielus stroomafwaarts van de toerit. In Nederland wordt toeritdosering ingeschakeld op basis van gegevens van de detectielus stroomopwaarts van de toerit. Om filegolven succesvol op te kunnen lossen, moet het ontstaan van een filegolf echter stroomafwaarts van de toerit gedetecteerd worden.

Verder wordt aanbevolen om een feedback regeling te gebruiken, zowel bij een regeling met en een regeling zonder toeritdosering. Bij een feedback regeling wordt de regeling aangepast als de verkeerssituatie stroomopwaarts van de filegolf verandert. Bij een feedforward-regeling, zoals bij Specialist is dit niet het geval. Mogelijk kan de benadering waarbij de snelheid verhoogd wordt in 80 km-zones ook gecombineerd worden met toeritdosering. Door het verkeer op de toerit te doseren kunnen weefproblemen voorkomen

worden. In dit onderzoek wordt niet verder ingegaan op deze mogelijkheid.

Aanpassing algoritme

Uit de analyse van Specialist is gebleken dat het algoritme nog niet altijd goed werkt en moet op een aantal punten worden aangepast om de werking ervan te verbeteren. De andere algoritmen zijn nog niet in de praktijk getest, waardoor hier geen uitspraak over gedaan kan worden. Wel zullen sommige algoritmen aangepast moeten worden aan de weglay-out, bijvoorbeeld bij de aanwezigheid van toeritten met hoge intensiteiten. Om de toepasbaarheid van Specialist en Distributed Controller te vergroten zullen dynamische maximumsnelheden gecombineerd moeten worden met toeritdosering. Bij een uitbreiding van de regeling kan gedacht worden aan de vernieuwde regeling die omschreven is in paragraaf 3.4.

Drempelwaarden

Filegolven en staande files kunnen gedetecteerd worden met drempelwaarden op basis van de gemeten intensiteit en snelheid. Hiermee kan bepaald worden wanneer de toeritdosering of dynamische maximumsnelheden ingeschakeld moeten worden. Overige parameters die bepaald moeten worden zijn afhankelijk van het algoritme dat gekozen wordt en zullen door middel van simulaties vastgesteld moeten worden.

Bij doorstromingsproblemen in 80 km zones moet historische data stroomafwaarts van de bottleneck geanalyseerd worden om de maatgevende intensiteit voor het ontstaan van congestie te bepalen. In deze fase van de methode is het echter nog niet mogelijk om exacte parameters van een algoritme vast te stellen. Hier is een uitgebreide analyse zoals een simulatie of zelfs een praktijktest voor nodig.

Samenwerking AID

In principe kunnen de AID en het algoritme met dynamische maximumsnelheden onafhankelijk van elkaar werken. Als beide algoritmen op basis van de drempelwaarden ingeschakeld moeten worden zal de laagste snelheid gelden. Over het algemeen zullen de dynamische maximumsnelheden stroomopwaarts van de file gelden en de AID in de file.

4.5 Conclusie

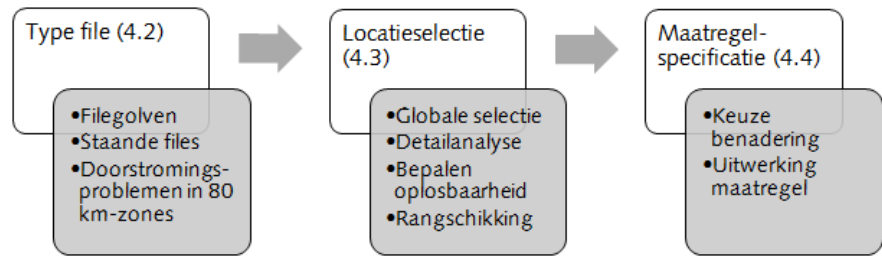
De hoofddoelstelling van dit onderzoek is als volgt gedefinieerd:

.....
Doelstelling:

Het ontwikkelen van een methode voor de selectie van geschikte locaties voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden en waarmee de maatregel zo uitgewerkt wordt dat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt.

De methode die in dit hoofdstuk is ontwikkeld, is in Figuur 4.12 schematisch weergegeven.

Figuur 4.12: Schematische weergave methode



Aan de hand van deze methode kunnen de deelvragen 4-6 worden beantwoord:

4. *Op basis van welke criteria kunnen geschikte locaties worden geselecteerd voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden?*

De criteria die gebruikt worden voor het selecteren van geschikte locaties verschillen per type file. Ook worden er in de verschillende fasen van de locatieselectie (globale selectie, detailanalyse, oplosbaarheid en rangschikking) andere criteria gebruikt.

5. *Op welke manier kunnen dynamische maximumsnelheden toegepast worden om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren?*

De manier waarop dynamische maximumsnelheden toegepast moeten worden volgt uit de literatuurstudie. In de maatregelspecificatie wordt beschreven hoe afhankelijk van de situatie een geschikte benadering gekozen kan worden en hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden zodat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt.

6. *Hoe kunnen de effecten van dynamische maximumsnelheden van tevoren voorspeld worden?*

In de methode wordt bij het bepalen van de oplosbaarheid en mogelijke uitstel van files een voorspelling gedaan van de mogelijke winst in voertuigverliesuren. Op basis van deze winst kunnen de locaties worden gerangschikt.

Het effect van dynamische maximumsnelheden kan echter beter voorspeld worden door middel van een simulatiestudie of een praktijktest. Ook kunnen op deze manier exacte drempelwaarden en parameters van een benadering gesteld worden.

Hieronder zullen de verschillende onderdelen uit de methode worden toegelicht.

Globale selectie

Bij de globale selectie worden locaties met filegolven geselecteerd op basis van de i/c verhouding op een traject. Bij een staande file is vooral de locatie van de file en de lengte van de file belangrijk. De globale selectie van 80 km-zones zal gebaseerd zijn op de aanwezigheid van bottlenecks in 80 km-zones.

Detailanalyse

De detailanalyse bestaat uit het verwerken van data in Monigraph, waarna de verschillende typen files kunnen worden geïdentificeerd. Filegolven worden geïdentificeerd op basis van intensiteiten, snelheden en de golfsnelheid. Staande files worden ook geïdentificeerd op basis van intensiteiten en snelheden. Doorstromingsproblemen in 80 km-zones kunnen waargenomen worden door te kijken naar de spreiding in snelheden en het verschil in dichtheid tussen de rijstroken.

Na de identificatie worden de toestanden rondom de file bepaald. Dit vormt de input voor het bepalen van de oplosbaarheid.

Oplosbaarheid en rangschikking

De rangschikking van locaties wordt bepaald op basis van de oplosbaarheid of mogelijke uitstel van files en de mogelijke winst in voertuigverliesuren. Op deze manier kan van tevoren een schatting gemaakt worden van het effect van dynamische maximumsnelheden op de doorstroming (deelvraag 6).

Bij filegolven en staande files bij toeritten wordt de oplosbaarheid gecontroleerd door het regelschema te construeren op basis van schokgolftheorie. Bij 80 km-zones zal nog meer onderzoek gedaan moeten worden naar de verkeerssituatie die ontstaat bij een tijdelijke verhoging van de snelheid om de mate van uitstel te kunnen bepalen.

Maatregelspecificatie

Bij filegolven en staande files bij toeritten is een instroombeperkende regelfilosofie noodzakelijk om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren. Afhankelijk van de aanwezigheid van toeritten en de intensiteit op de toeritten is een combinatie van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering noodzakelijk.

In 80 km-zones kan gebruik gemaakt worden van een snelheidsverhoging in de randen van de spits om de doorstroming te verbeteren.

Om de lengte van het traject te kunnen bepalen kan gekeken worden naar de afstand waarover de file zich verplaatst en het traject dat nodig is om de file op te lossen.

De effectieve snelheidslimiet is afhankelijk van de mate van handhaving.

5. Case Study

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de methode die beschreven is in hoofdstuk 4 toegepast. Deze Case Study moet dan ook inzicht geven of de methode geschikt is om in de praktijk toe te passen.

In de methode wordt beschreven hoe er locaties voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden geselecteerd kunnen worden en hoe de maatregel op een specifieke locatie uitgewerkt kan worden zodat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt.

Hoewel de locatieselectie voor drie verschillende problemen is uitgewerkt zal de Case Study gericht zijn op het selecteren van locaties waar filegolven optreden, aangezien de meeste benaderingen met dynamische maximumsnelheden gericht zijn op het oplossen van filegolven. Voor het selecteren van locaties met staande files zal meer onderzoek gedaan moeten worden naar de verkeerssituatie waarbij dynamische maximumsnelheden de files op kunnen lossen. In 80 km-zones zijn de mogelijkheden voor het toepassen van dynamische maximumsnelheden momenteel beperkt. In de 80 km-zones waar doorstromingsproblemen zijn wordt al geëxperimenteerd of zijn er plannen voor experimenten met dynamische maximumsnelheden.

5.2 Locatieselectie

De locatieselectie bestaat uit een globale selectie van locaties, waarna er meer in detail naar de verkeerssituatie wordt gekeken om te bepalen of de specifieke problemen optreden en in welke mate deze problemen met dynamische maximumsnelheden op te lossen zijn. Uiteindelijk moet dit leiden tot een rangschikking van locaties op basis van de mogelijke winst in voertuigverliesuren.

5.2.1 Globale selectie van locaties met filegolven

Uit onderzoek is gebleken dat er filegolven ontstaan als de i/c verhouding hoger ligt dan 0,7. Als dit het geval is voor een traject dat langer is dan 9 km, is dat traject mogelijk geschikt voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden.

Voor het bepalen van de intensiteiten wordt er gebruik gemaakt van de InWeVa-database uit 2008. In deze database staan etmaalintensiteiten per werkdag gegeven. Deze intensiteiten moeten omgerekend naar uurintensiteiten, waarbij ervan uitgegaan wordt dat het aandeel van de drukste uurintensiteit 12 procent bedraagt (Sanders, 2004). In deze database staat echter geen informatie over het aantal rijstroken dat nodig is om de capaciteit te kunnen bepalen. Daarom is de InWeVa-database gekoppeld aan de WEGGEG-database, waarin per wegvak het aantal rijstroken gegeven is. Vervolgens kan de i/c verhouding berekend worden op basis van de drukste uurintensiteit en een

capaciteit van 2150 vtg/rijstrook. Wegvakken waarin het aantal rijstroken wisselt zijn hierbij buiten beschouwing gelaten, omdat hiervan geen juiste schatting van de capaciteit gedaan kan worden. Vervolgens is er gezocht naar trajecten die langer zijn dan negen kilometer en een i/c verhouding hebben die groter is dan 0,7. Aangezien er een aantal wegvakken uit de selectie zijn gehaald in verband met een wisselend aantal rijstroken binnen een wegvak wordt een onderbreking in het traject van één kilometer toegestaan.

Er zijn in deze globale selectie relatief veel aannames gedaan, waarbij de keuze voor het aandeel van de drukste uurintensiteit de grootste invloed op de i/c verhouding heeft. Hiervoor is 12 procent gekozen, zodat er in ieder geval niet te weinig trajecten geselecteerd worden. Een andere aanname is de schatting van de capaciteit van een wegvak. Door wegvakken waarbij de capaciteit moeilijk kan worden geschat buiten beschouwing te laten worden fouten voorkomen. Ook worden onbetrouwbare metingen in de InWeVa-database in de schatting van intensiteiten gecompenseerd doordat er naar trajecten van ten minste negen kilometer wordt gekeken.

Het resultaat hiervan is meer dan honderd trajecten op 22 verschillende wegen en richtingen variërend in lengte van 9 tot 60 km. Het overzicht van deze trajecten is weergegeven in Bijlage IV.

Als deze trajecten vergeleken worden met de trajecten die door Transpute zijn aangemerkt als filegolflocaties blijkt dat alle trajecten van Transpute ook binnen deze selectie vallen. Bij de selectie van Transpute is echter alleen gekeken naar 10 werkdagen, waardoor er onjuist beeld kan ontstaan van de filegolflocaties.

5.2.2 Detailanalyse van geselecteerde locaties met filegolven

.....
Figuur 5.1: Schematische weergave detailanalyse



De volgende stap is het verwerken van lusdata in Monigraph van de trajecten uit de globale selectie. Aangezien een groot deel van de trajecten in meerdere provincies liggen is er gebruik gemaakt van MoniBas-data. Om een beeld te krijgen of er op de trajecten uit de globale selectie ook daadwerkelijk filegolven optreden is dit gedaan voor acht willekeurige trajecten. Om een representatief beeld te krijgen van de verkeerssituatie op een traject is er gekeken naar de werkdagen van 3 tot 14 maart in 2008 van 6:00 tot 19:00. Voor het aggregatie-interval is 1 minuut gekozen.

De trajecten zijn in hieronder weergegeven:

- A1Re Hoevelaken km 48 – Hoenderloo km 80
- A2Re Holendrecht km 33- Oudenrijn km 63
- A2Re Oudenrijn km 64 – Waardenburg km 95
- A4Re De Nieuwe meer km 0 – Burgerveen km 18
- A4Re Roelofarendsveen km 23 - Den Haag-Zuid km 53

- A9Re Holendrecht km 21 - Badhoevedorp km 36
- A12Re Gouwe km 27 – Bunnik km 70
- A12Li Veenendaal km 92 - Zoetermeer km 15
- A15Re Hendrik Ido Ambacht km 72 – Gorinchem km 95
- A27Re St. Annabosch km 0 – Noordeloos km 45

Zonder de data uitgebreid te analyseren kan op basis van intensiteit- en snelheidcontourplots al iets gezegd worden over het optreden van filegolven. Op de meeste trajecten is te zien dat er met een hoge frequentie filegolven optreden. Op de A4 treden er echter vooral staande files op rondom de aansluiting met de N11 (km 30). De hoge verkeersintensiteiten rondom knooppunt Prins Clausplein zouden kunnen verklaren waarom dit traject toch binnen de selectie valt. In Bijlage V zijn een aantal contourplots van bovenstaande trajecten weergegeven.

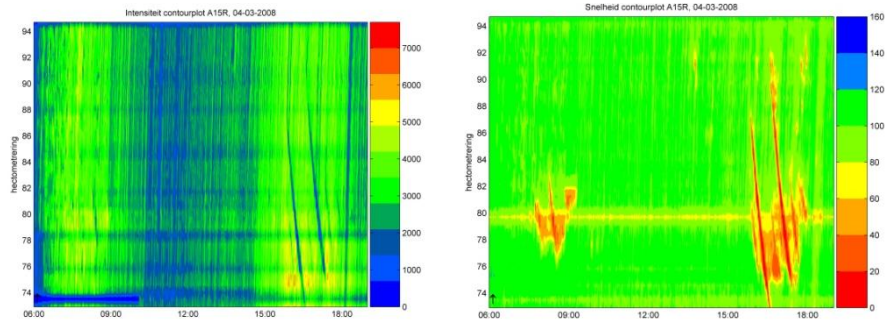
Uit deze selectie zijn twee trajecten gekozen om in meer detail te kijken naar het optreden van filegolven. Om een goede vergelijking van de trajecten te kunnen maken zijn trajecten gekozen waarbij duidelijk filegolven optreden. Op het ene traject is de frequentie echter groter. Het eerste traject is de A15Re tussen Hendrik Ido Ambacht en Gorinchem. Het traject is weergegeven in Figuur 5.2.

Figuur 5.2: Overzicht traject A15Re
Hendrik Ido Ambacht-Gorinchem



Op dit traject bevinden zich vijf toeritten. Van west naar oost zijn dit Alblasterdam, Papendrecht (N3), Sliedrecht-West, Sliedrecht-Oost en Hardinxveld Giessendam. Het eerste deel van het traject bestaat uit drie rijstroken. Na de tunnel onder de Noord gaat dit over in drie rijstroken en een uitvoegstrook tot de afrit bij Alblasterdam. Vanaf de aansluiting bij Papendrecht bestaat het traject uit twee rijstroken. Er gelden ook verschillende maximumsnelheden op dit traject. Tot Alblasterdam geldt een maximumsnelheid van 100 km/u en stroomafwaarts daarvan geldt een maximumsnelheid van 120 km/u.

.....
 Figuur 5.3: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van het traject op 04-03-2008



In Figuur 5.3 is links een intensiteit contourplot en rechts een snelheid contourplot weergegeven van een karakteristieke dag op de A15. Hier zijn twee filegolven waar te nemen met een combinatie van een lage intensiteit en snelheid. Deze filegolven ontstaan ter hoogte van Hardinxveld Giessendam en doven pas uit ter hoogte van Hendrik Ido Ambacht. Bij aansluiting Papendrecht verplaatsen de filegolven zich stroomopwaarts door een staande file.

.....
 Figuur 5.4: Overzicht traject A2Re Holendrecht-Oudenrijn

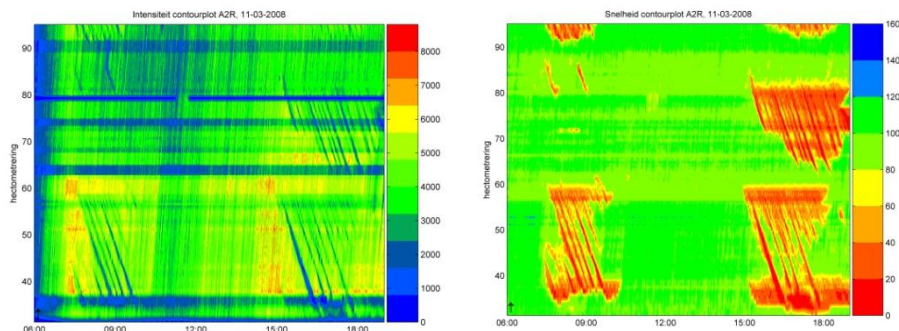


Het tweede traject waar in meer detail naar zal worden gekeken is de A2 tussen knooppunt Holendrecht (km 33) en knooppunt Oudenrijn (km 63). In Figuur 5.4 is een overzicht van dit traject weergegeven. Ook op dit traject bevinden zich vijf toeritten: Abcoude, Loenen, Breukelen, Maarssen en Lage Weide. Het gehele traject bestaat uit drie rijstroken en er geldt een maximumsnelheid van 120 km/u.

De frequentie van filegolven op dit traject ligt duidelijk hoger dan op de A15. In Figuur 5.5 is links een intensiteit contourplot en rechts een snelheid contourplot weergegeven van een karakteristieke dag op de A2. Het onderste gedeelte van de plots betreft het traject tussen knooppunt Holendrecht en Oudenrijn. In de afbeeldingen is te zien dat de filegolven vooral

loskomen uit staande files die ontstaan bij knooppunt Oudenrijn.

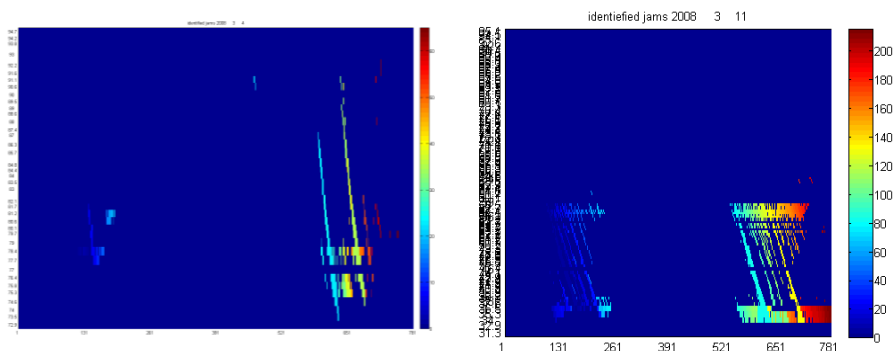
.....
 Figuur 5.5: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van het traject op 11-03-2008



Met behulp van Matlab zijn voor negen werkdagen (van 5 maart was geen data beschikbaar) de filegolven geïdentificeerd op basis van de drempelwaarden voor intensiteit, snelheid en golfsnelheid. De manier waarop de identificatie uitgevoerd is, is terug te vinden in paragraaf 4.3.2.

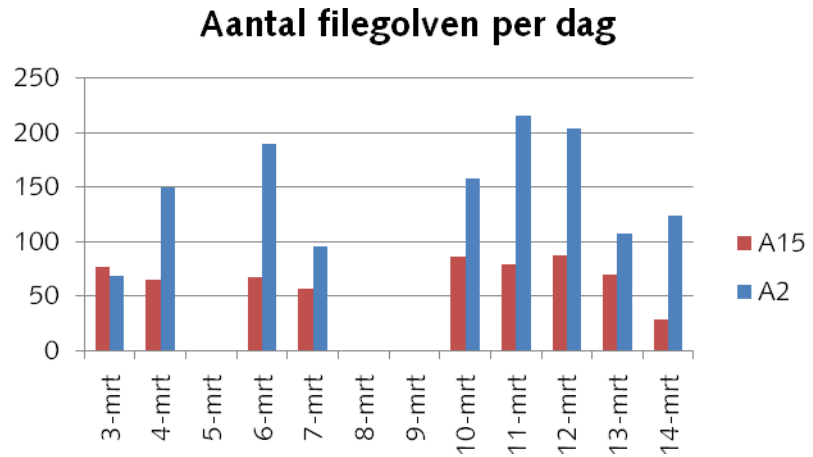
In Figuur 5.6 zijn voor de A15 (links) en de A2 (rechts) de geïdentificeerde filegolven weergegeven. Elke filegolf heeft een andere kleur. De resultaten zijn vergelijkbaar met de snelheid en intensiteit contourplots uit Figuur 5.3 en Figuur 5.5.

.....
 Figuur 5.6: Geïdentificeerde filegolven op de A15 (links) en de A2 (rechts)



Daarnaast wordt per filegolf het begin- en eindpunt bepaald en de afstand waarover de filegolf zich verplaatst. Verder is het tijdstip waarop de filegolf ontstaat en uitdooft bepaald, de gemiddelde lengte van de filegolf en het aantal voertuigverliesuren per golf.

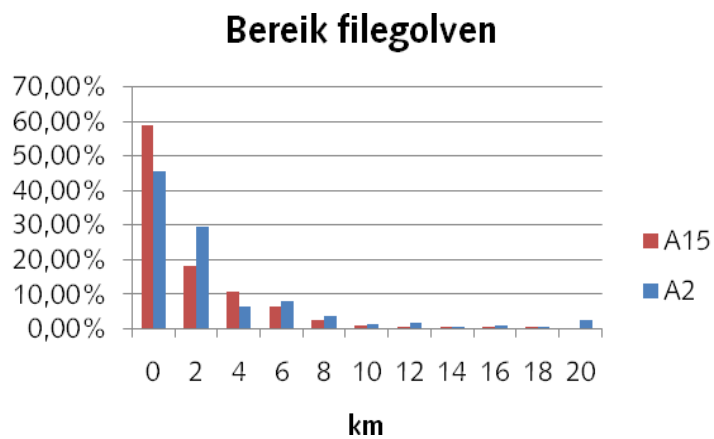
.....
 Figuur 5.7: Aantal geïdentificeerde filegolven per dag op de A15 en de A2



In Figuur 5.7 is het aantal filegolven per dag op de A15 en de A2 weergegeven. De frequentie van het aantal filegolven op de A2 ligt duidelijk hoger. Op de A15 traden er gemiddeld 68 filegolven per dag op en op de A2 traden er gemiddeld 145 filegolven per dag op. Hoewel dit aantal erg groot lijkt is een groot deel van de filegolven erg klein. Ook zal dit in de praktijk vaak betekenen dat één filegolf uit meerdere kleine filegolven bestaat.

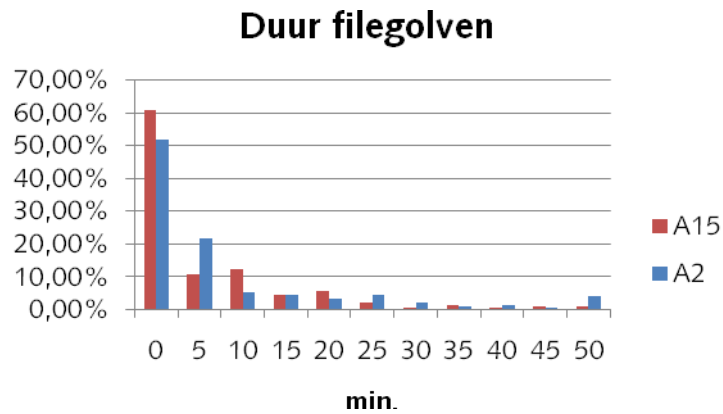
Om de kenmerken van de filegolven, zoals bereik, duur en aantal VVU/golf op de verschillende trajecten met elkaar te kunnen vergelijken worden de percentages van het totaal aantal filegolven met elkaar vergeleken. De vergelijkingen zijn weergegeven in Figuur 5.8, Figuur 5.9 en Figuur 5.10.

.....
 Figuur 5.8: Verdeling van de afstand waarover de filegolven zich verplaatsen



In Figuur 5.8 is het bereik van de filegolven weergegeven en is duidelijk te zien dat het grootste gedeelte van de filegolven zich over een afstand korter dan twee kilometer verplaatst. Op de A15 zijn relatief meer korte filegolven te vinden dan op de A2. 7,3% van de filegolven op de A2 verplaatst zich over een afstand van meer dan 10 kilometer. Op de A15 is dit gelijk aan 3,3%.

.....
 Figuur 5.9: Verdeling van de duur van de filegolven



De duur van de filegolven laat dezelfde resultaten zien (Figuur 5.9). Op de A15 zijn de filegolven over het algemeen minder lang aanwezig. 3,9% van de filegolven op de A15 is langer dan 30 minuten aanwezig op het traject. Op de A2 is dit aandeel gelijk aan 8,9%.

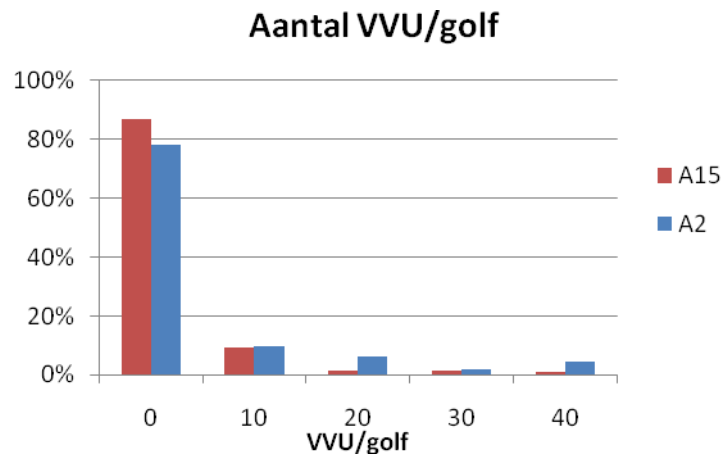
Het aantal voertuigverliesuren is op twee verschillende manieren bepaald. De eerste methode is gebaseerd op de methode van Rijkswaterstaat waarbij het rijtijdverlies ten opzichte van 100 km/u bepaald wordt. De tweede methode is gebaseerd op het verschil in dichtheid ten opzichte van vrije afwikkeling (20 vtg/km/strook). In de methode werd geadviseerd om de snelheid en dichtheid in de filegolf af te leiden van de toestand stroomafwaarts van de filegolf, de intensiteit in de filegolf en de golfsnelheid. Vooral in de tijdstappen waarin de filegolf net ontstaat, klopt deze berekening niet. Doordat het gebied stroomafwaarts van de filegolf soms erg klein was, volgden daaruit erg lage waarden voor de intensiteit en snelheid, waardoor de dichtheid in de filegolf erg laag werd (soms zelfs negatief). Omdat dit niet overeen komt met de werkelijkheid is besloten om de dichtheid in de filegolf toch te bepalen op basis van gemeten snelheden. In Tabel 5.1 zijn het aantal VVU per methode en per traject weergegeven.

.....
 Tabel 5.1: Aantal VVU per traject en per methode

	VVU-dichtheid	VVU-RWS
A15	2.920	4.178
A2	12.845	20.432

Het verschil tussen beide methodes is te verklaren door de aannames die gedaan zijn, zoals de snelheid en dichtheid in vrije afwikkeling. De dichthedenmethode geeft echter een beter inzicht in de vertraging ten opzichte van vrije afwikkeling. Er is daarom voor gekozen om door te rekenen met het aantal VVU op basis van dichtheid.

Figuur 5.10: Verdeling van het aantal VVU per filegolf.

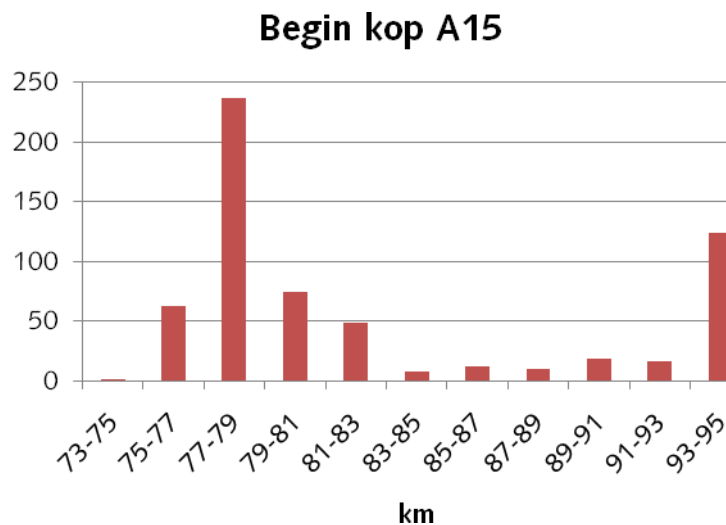


Het aantal voertuigverliesuren per golf op basis van de dichthedenmethode is weergegeven in Figuur 5.10. Een groot deel van de filegolven op de A15 en de A2 zorgen voor minder dan 10 VVU. Op de A15 zorgt 3,9% van de filegolven voor meer dan 20 VVU en op de A2 is dit gelijk aan 12,5%.

Ook is er gekeken naar de gemiddelde lengte van de filegolven. Op de A2 zijn de filegolven gemiddeld 0,9 km lang. Op de A15 zijn de filegolven gemiddeld 0,8 km lang.

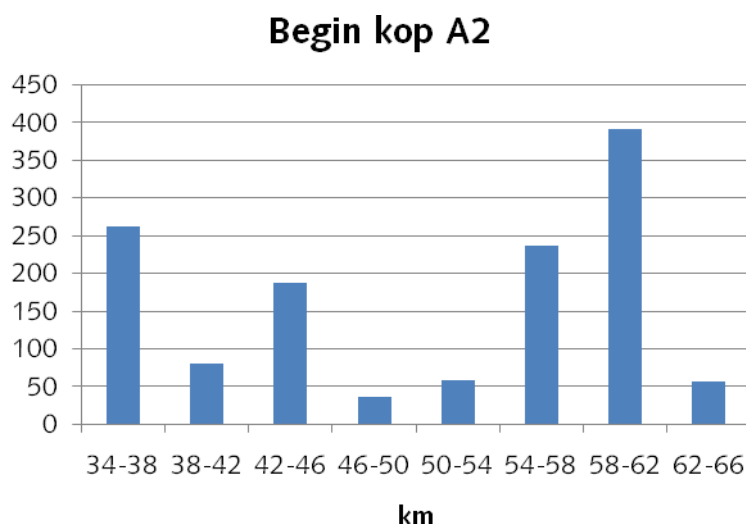
De meeste filegolven ontstaan ter hoogte van een bottleneck. Om de bottlenecks op het traject te kunnen bepalen is er daarom gekeken naar de locaties waar de kop van de filegolf ontstaat.

Figuur 5.11: Locaties op de A15 waar regelmatig filegolven ontstaan



De verdeling van de locaties op de A15 waar de kop ontstaat zijn weergegeven in Figuur 5.11. Het grootste deel van de filegolven ontstaat rondom de aansluiting met de N3 bij Papendrecht (km. 79). Ook ontstaan er veel filegolven net stroomopwaarts van knooppunt Gorinchem. Ongeveer 56% van de filegolven ontstaat in de avondspits.

.....
 Figuur 5.12: Locaties op de A2 waar
 regelmatig filegolven ontstaan



Op de A2 treedt 42% van de filegolven op in de avondspits. De meeste filegolven treden op ter hoogte van Lage Weide (km. 58,9). De verdeling van locaties waar regelmatig filegolven ontstaan is weergegeven in Figuur 5.12.

Om het effect van toeritdosering te kunnen bepalen wordt het verschil in intensiteit tussen de eerste lus stroomopwaarts en de eerste lus stroomafwaarts van de toerit bepaald. In Tabel 5.2 wordt voor de A15 per toerit inzicht gegeven in de toename van de gemiddelde intensiteit per strook op de hoofdrijbaan. Ter hoogte van toerit Alblasserdam heeft de A15 drie rijstroken. Bij de overige toeritten heeft de A15 twee rijstroken. In Tabel 5.2 zijn de gemiddelde toeritintensiteiten per dag (5-14 maart) weergegeven. Bij de berekening van de oplosbaarheid wordt echter per dag het gemiddelde berekend.

.....
 Tabel 5.2: Toeritintensiteiten per
 strook op de A15

Alblasserdam	Papendrecht	Sliedrecht- West	Sliedrecht -Oost	Hardinxveld Giessendam
Km 75.9	Km 79	Km 80.8	Km 84.4	Km 88.3
143 vtg/u/str	391 vtg/u/str	41 vtg/u/str	164 vtg/u/str	105 vtg/u/str

Hieruit is af te leiden dat vooral de toeritten Alblasserdam, Papendrecht en Sliedrecht-Oost in aanmerking zullen komen voor de toepassing van toeritdosering.

In Tabel 5.3 zijn de intensiteiten op de toeritten van de A2 weergegeven.

.....
 Tabel 5.3: Toeritintensiteiten per
 strook op de A2

Abcoude	Loenen	Breukelen	Maarssen	Lage Weide
Km 39.1	Km 43.8	Km 49.1	Km 57.1	Km 58.9
34 vtg/u/str	-54 vtg/u/str	8 vtg/u/str	181 vtg/u/str	234 vtg/u/str

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de toeritten Maarssen en Lage Weide toeritten zijn met hoge intensiteiten. Bij de toeritten Abcoude en

Breukelen zijn de intensiteiten zo laag dat toeritdosering niet noodzakelijk is om de intensiteit op de hoofdrijbaan te beperken. Bij de toerit Loenen is geen lus aanwezig tussen de af- en toerit, waardoor de intensiteit negatief is. Om dit soort problemen te voorkomen zullen detectielussen op de toerit noodzakelijk zijn om de intensiteiten op de toerit te kunnen meten.

De overige indicatoren die noodzakelijk zijn om de oplosbaarheid te kunnen bepalen zijn de toestanden in en rondom de filegolven, zoals intensiteiten en snelheden. Deze indicatoren worden per minuut berekend. Bij de aanwezigheid van een toerit worden de toestanden stroomafwaarts en stroomopwaarts daarvan als homogeen beschouwd. Stroomopwaarts van de toerit is het echter mogelijk dat er ook een afrit aanwezig is waardoor de toestand niet meer homogeen is. Het regelschema stroomopwaarts van de toerit wordt dan onjuist geconstrueerd. Aangezien de oplosbaarheid van de filegolf vooral bepaald wordt door de toestand stroomafwaarts van de toerit (verkeer dat direct in de filegolf rijdt), zal de toestand stroomopwaarts van de toerit als homogeen worden beschouwd. In een vervolgonderzoek wordt aanbevolen om hier wel onderscheid in te maken, zodat een realistischer regelschema ontstaat. Hierdoor kan ook voorkomen worden dat de intensiteit stroomopwaarts van toerit hoger is dan stroomafwaarts van de toerit.

De toestand die bereikt wordt na het toepassen van toeritdosering zal worden gedefinieerd als de berekende intensiteit stroomafwaarts vermindert met de hoeveelheid verkeer dat door toeritdosering wordt tegengehouden.

5.2.3 Bepalen oplosbaarheid van de filegolven

Figuur 5.13: Schematische weergave bepalen oplosbaarheid



De resultaten uit de detailanalyse vormen de input voor het bepalen van de oplosbaarheid. Om de trajecten goed met elkaar te kunnen vergelijken wordt de oplosbaarheid voor verschillende combinaties van snelheidslimieten en doseringsgraden berekend. Als mogelijke snelheidslimieten zijn 60, 65 en 70 km/u gekozen. De toeritintensiteiten variëren tussen 180 vtg/uur en 900 vtg/uur met stappen van 60 vtg/uur.

Voor het bepalen van de oplosbaarheid is de in paragraaf 3.4 ontwikkelde regeling gebruikt waarbij dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering. De berekeningen die beschreven zijn in Bijlage III zijn geïmplementeerd in Matlab. Het resultaat van deze analyse is het procentueel aantal filegolven dat als oplosbaar is en de mogelijke winst in VVU.

Een andere parameter in het algoritme voor het bepalen van de oplosbaarheid die vastgesteld moet worden en niet wordt gevarieerd is de maximale dichtheid bij toepassing van dynamische

maximumsnelheden. De dichtheid die hiervoor aangenomen wordt is 28 vtg/km/strook. De intensiteit is afhankelijk van de snelheidslimiet. In Figuur 3.1 is dit toestand 4.

Ook wordt de toestand waarin het verkeer terechtkomt na het opheffen van de snelheidslimieten als een vaste waarde aangenomen. De snelheid wordt hierbij gelijk gesteld aan 80 km/u. De intensiteit komt overeen met de maximale intensiteit en is gelijk aan 2200 vtg/u. In Figuur 3.1 is dit toestand 5.

Op de A15 mag het regelschema niet stroomopwaarts van km 72,9 geconstrueerd worden. Dit is de eerste matrixsignaalgever na de oprit bij Hendrik Ido Ambacht. Op de A2 ligt dit punt bij km 37,6, de eerste lus na knooppunt Holendrecht. Op de A15 geldt als extra voorwaarde voor de constructie van het regelschema dat het aantal rijstroken niet mag wisselen binnen het regelschema. Op deze manier ontstaan er geen onrealistische regelschema's.

De winst in VVU wordt bepaald op basis van het eerste moment waarop de filegolf als oplosbaar wordt beschouwd en is afhankelijk van de snelheidslimiet en de doseringsgraad. Er wordt dus geen rekening gehouden met een meetvertraging, omdat de rekentijd van het algoritme te verwaarlozen is.

In Tabel 5.4 is de totaal mogelijke winst in VVU over negen werkdagen op de A15 weergegeven bij verschillende combinaties van doseringsgraden en snelheidslimieten. Tussen haakjes is het aantal opgeloste filegolven weergegeven. Bij hogere waarden voor de effectieve snelheidslimiet is te zien dat de winst in VVU afneemt. Ook zorgt een lagere toeritdoseringsintensiteit voor minder VVU. Bij een hogere toeritdoseringsintensiteit en een hogere waarde voor de snelheidslimiet neemt het aantal opgeloste filegolven af.

Tabel 5.4: Winst in VVU op de A15 bij verschillende combinaties van doseringsgraden en snelheidslimieten

Toerit-doserings-intensiteit (vtg/u)	Snelheidslimiet (km/u)		
	60	65	70
180	645.39 (152)	572.61 (129)	466.71 (116)
240	644.37 (152)	556.83 (129)	465.31 (116)
300	643.63 (152)	556.83 (129)	400.55 (115)
360	643.63 (152)	556.83 (129)	400.55 (115)
420	643.63 (152)	556.83 (129)	400.55 (115)
480	643.63 (152)	556.83 (129)	400.55 (115)
540	643.63 (151)	556.83 (129)	400.55 (115)
600	643.63 (151)	556.83 (129)	400.55 (115)
660	643.63 (151)	556.83 (129)	399.44 (114)
720	643.63 (151)	556.83 (129)	399.44 (114)
780	643.63 (151)	556.83 (129)	399.44 (114)
840	643.63 (151)	556.83 (129)	399.44 (114)
900	643.63 (151)	556.83 (129)	399.44 (114)

Het verschil in winst in VVU tussen de verschillende doseringsgraden is echter erg klein. In de meeste gevallen wordt dit verschil veroorzaakt doordat een filegolf bij een hogere toeritdoseringsintensiteit niet meer oplosbaar is. Een andere mogelijkheid is dat de filegolf bij een hogere toeritdoseringsintensiteit pas stroomopwaarts van de toerit wordt opgelost. Het inschakelen van toeritdosering heeft dan geen effect meer op de snelheid van oplossen en het aantal VVU. Voor het toepassen van toeritdosering is vooral de toerit bij Papendrecht van belang door de hoge toeritintensiteiten. Een groot deel van de filegolven zal echter stroomafwaarts van deze toerit al opgelost zijn. In sommige gevallen zal de filegolf bij een lagere toeritdoseringsintensiteit sneller opgelost worden. Dit is echter niet zichtbaar in het aantal VVU. Het aantal VVU wordt namelijk berekend per minuut en de tijdsverschillen zijn vaak kleiner dan één minuut.

In Tabel 5.5 is de totaal mogelijke winst in VVU over negen werkdagen op de A2 weergegeven. Tussen haakjes is het aantal opgeloste filegolven weergegeven.

Tabel 5.5: Winst in vvu op de A2 bij verschillende combinaties van doseringsgraden en snelheidslimieten

Toerit-doserings-intensiteit (vtg/u)	Snelheidslimiet (km/u)		
	60	65	70
180	1909.18 (303)	1395.70 (243)	771.28 (191)
240	1784.23 (301)	1392.85 (240)	768.44 (190)
300	1781.00 (300)	1392.85 (240)	768.44 (188)
360	1781.00 (300)	1388.83 (238)	768.44 (188)
420	1780.12 (300)	1387.89 (238)	764.93 (187)
480	1780.12 (300)	1387.89 (238)	763.04 (187)
540	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)
600	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)
660	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)
720	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)
780	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)
840	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)
900	1778.89 (300)	1387.89 (238)	762.52 (187)

Ook hier neemt de winst in VVU af naarmate de snelheidslimiet toeneemt en de toeritdoseringsintensiteit toeneemt en lossen er iets minder filegolven op. Het geringe verschil tussen de verschillende doseringsgraden kan op dezelfde manier verklaard worden als bij de A15. Door de lage toeritintensiteiten op andere toeritten zullen voornamelijk de toeritten Maarssen en Lage Weide van belang zijn voor het toepassen van toeritdosering. De aanwezigheid van staande files rondom deze toeritten kan er verder voor zorgen dat het toepassen toeritdosering bij deze toeritten weinig effect heeft op de winst in VVU, omdat de files op die locaties als onoplosbaar kunnen worden beschouwd. Deze staande files kunnen mogelijk ook opgelost worden

door bijvoorbeeld de toeritdosering eerder in te schakelen. Hierdoor kan de winst in VVU vergroot worden.

In Tabel 5.6 worden de resultaten van de A15 en A2 met elkaar vergeleken op basis van de procentuele winst in VVU. Hierin is te zien dat de procentuele winst in VVU op de A15 groter is. Dit kan verklaard worden door de lagere frequentie van filegolven, waardoor filegolven makkelijker op te lossen zijn.

Tabel 5.6: Procentuele winst in VVU op de A15 en A2 bij verschillende combinaties van doseringsgraden en snelheidslimieten

Toerit-doserings-intensiteit (vtg/u)	Snelheidslimiet (km/u)					
	60		65		70	
	A15	A2	A15	A2	A15	A2
180	22.10%	14.86%	19.61%	10.87%	15.98%	6.00%
240	22.07%	13.89%	19.07%	10.84%	15.93%	5.98%
300	22.04%	13.86%	19.07%	10.84%	13.72%	5.98%
360	22.04%	13.86%	19.07%	10.81%	13.72%	5.98%
420	22.04%	13.86%	19.07%	10.80%	13.72%	5.95%
480	22.04%	13.86%	19.07%	10.80%	13.72%	5.94%
540	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.72%	5.94%
600	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.72%	5.94%
660	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.68%	5.94%
720	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.68%	5.94%
780	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.68%	5.94%
840	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.68%	5.94%
900	22.04%	13.85%	19.07%	10.80%	13.68%	5.94%

Voor het bepalen van de winst in VVU is geen rekening gehouden met de lengte van de wachtrij op de toerit. In de praktijk kan de toeritdoseringsintensiteit niet altijd maximaal beperkt worden. Om dit effect te kunnen bepalen zal gekeken moeten worden naar de lengte van de toerit en de tijdsduur dat de toeritdosering ingeschakeld is. Ook is er geen rekening gehouden met een mogelijke meetvertraging. Als de meetvertraging toeneemt, zal de winst in VVU afnemen.

In Tabel 5.7 is het procentueel aantal opgeloste filegolven weergegeven. In vergelijking tot de procentuele winst in VVU worden er procentueel meer filegolven opgelost. Dit wordt veroorzaakt doordat er ook filegolven meegerekend worden die uit zichzelf al oplossen. Er ontstaat hierdoor geen winst in VVU. De procentuele winst in VVU geeft dan ook een beter beeld van de verbetering van de doorstroming.

Tabel 5.7: Procentueel aantal opgeloste filegolven op de A15 en A2 bij verschillende combinaties van doseringsgraden en snelheidslimieten

Toerit-doserings-intensiteit (vtg/u)	Snelheidslimiet (km/u)					
	60		65		70	
	A15	A2	A15	A2	A15	A2
180	24.76%	23.15%	21.01%	18.56%	18.89%	14.59%
240	24.76%	22.99%	21.01%	18.33%	18.89%	14.51%
300	24.76%	22.92%	21.01%	18.33%	18.73%	14.36%
360	24.76%	22.92%	21.01%	18.18%	18.73%	14.36%
420	24.76%	22.92%	21.01%	18.18%	18.73%	14.29%
480	24.76%	22.92%	21.01%	18.18%	18.73%	14.29%
540	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.73%	14.29%
600	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.73%	14.29%
660	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.57%	14.29%
720	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.57%	14.29%
780	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.57%	14.29%
840	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.57%	14.29%
900	24.59%	22.92%	21.01%	18.18%	18.57%	14.29%

Hoewel het effect van toeritdosering beperkt is waar te nemen in de winst in VVU en het aantal opgeloste filegolven, kan toeritdosering in de praktijk ook bijdragen aan het voorkomen van nieuwe filegolven. Als er geen toeritdosering wordt toegepast en een filegolf lost stroomopwaarts van de toerit op, dan kan de verhoogde uitstroom een nieuwe filegolf veroorzaakt worden. Door toeritdosering toe te passen kan dit voorkomen worden.

In paragraaf 5.3 zal een voorbeeld gegeven worden van een situatie waarbij een filegolf met toeritdosering wel oplost en zonder toeritdosering later of niet.

5.3 Maatregelspecificatie

In deze paragraaf zal ingegaan worden op de mogelijke uitwerking van de maatregel op het traject met de hoogst mogelijke winst in VVU. Het traject op de A2 heeft een lengte van 25,3 km en loopt van knooppunt Holendrecht tot knooppunt Oudenrijn. Vanwege het grote aantal toeritten en hoge intensiteiten op de toeritten bij Maarssen en Lage Weide wordt aanbevolen om toeritdosering toe te passen.

Bij het bepalen van de mogelijke winst in VVU is gebleken dat het toepassen van toeritdosering ervoor kan zorgen dat meer filegolven opgelost kunnen worden of filegolven sneller oplossen.

Hieronder zullen twee voorbeelden gegeven worden waarbij het effect toeritdosering duidelijk zichtbaar is.

In het eerste voorbeeld ontstaat er een filegolf op 6 maart om 12:56 ter hoogte van de toerit Lage Weide (km 58,9) en is de filegolf zonder maatregel 12 minuten aanwezig. Na de toepassing van dynamische

maximumsnelheden en toeritdosering wordt de filegolf opgelost in de vijfde tijdstap (na 4 min.). Op dat moment kan de toeritdoseringsintensiteit beperkt worden bij de toerit Maarsse (km 57,1), waardoor de filegolf sneller oplost. De toerit ligt dan op locatie 2 in het regelschema, tussen de snijpunten D en E. Bij een toeritdoseringsintensiteit van 240 vtg/uur lost de filegolf pas op in de elfde tijdstap, stroomopwaarts van de toerit en heeft de toerit geen invloed meer op het oplossen van de filegolf. De winst in VVU wordt daardoor ook kleiner. Het verschil in winst in VVU bij verschillende doseringsgraden is weergegeven in Tabel 5.8.

Tabel 5.8: Verschil in winst in VVU bij verschillende doseringsgraden

v	q _{toerit}	Tijdstap	Toeritlocatie	Aantal VVU	Winst VVU
60 km/u	180	5	2	4.35	4.34
60 km/u	240	11	0	8.27	0.42

Een ander voorbeeld is een filegolf op 13 maart die ontstaat om 15:31 ter hoogte van de toerit Lage Weide (km 58,9). Deze filegolf is zonder maatregel 71 tijdstappen (81 minuten) aanwezig en dooft pas uit bij km 34,65 ter hoogte van knooppunt Holendrecht. Na toepassing van dynamische maximumsnelheden en toeritdosering lost de filegolf op in de tweede tijdstap (na 2 min.) bij een toeritdoseringsintensiteit van 180 vtg/uur. Bij een hogere toeritdoseringsintensiteit lost de filegolf niet meer op en valt er geen winst in VVU te behalen. Het verschil in winst in VVU bij verschillende doseringsgraden is weergegeven in Tabel 5.9.

Tabel 5.9: Verschil in winst in VVU bij verschillende doseringsgraden

v	q _{toerit}	Tijdstap	Toeritlocatie	Aantal VVU	Winst VVU
60 km/u	180	4	2	3.43	118.19
60 km/u	240	71	0	121.62	0

Afgaand op de lengte van het traject is een voorspellende benadering mogelijk zonder dat er teveel meetvertraging optreedt. Mogelijke benaderingen zijn MPC voor een optimale coördinatie van toeritdosering en variabele snelheidslimieten en geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten. Hierbij wordt de voorkeur gegeven aan de eerste benadering, omdat de verkeerssituatie bij dit algoritme teruggekoppeld wordt, nadat snelheidslimieten toegepast zijn. Het voordeel van deze benaderingen is verder dat snelheidslimieten gecombineerd worden met toeritdosering. Door intensiteit op de toerit te beperken kunnen meer filegolven (sneller) opgelost worden. Voor de snelheidslimiet wordt 60 km/u met een rode rand aanbevolen. De winst in VVU zal dan lager uitvallen dan berekend, omdat de gereden snelheid waarschijnlijk rond de 75 km/u zal liggen. (op basis van resultaten van Specialist) Als het belang van dynamische maximumsnelheden duidelijker wordt voor de weggebruiker kan het effect waarschijnlijk vergroot worden. De naleving kan ook vergroot worden door het toepassen van strenge handhaving. De parameters die voor een MPC benadering van tevoren vastgesteld moeten worden zijn de voorspellingshorizon en de regelhorizon. De voorspellingshorizon moet lang genoeg zijn om het effect van de regeling mee te nemen, inclusief de vertraging van het systeem. De

regelhorizon kan vastgesteld worden door trial-and-error. Randvoorwaarden zijn niet teveel schommelingen in de snelheidslimiet, alleen afgeronde waarden voor de snelheidslimiet en een maximale doseringsgraad. Voor de verdere uitwerking van de maatregel zoals de keuze van parameters, wordt aanbevolen om een voorspellingsmodel te gebruiken. Hiermee kunnen de verwachte effecten van dynamische maximumsnelheden en toeritdosering nauwkeuriger voorspeld worden.

6. Evaluatie methode

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op de geschiktheid van de verschillende onderdelen uit de ontwikkelde methode. Hierbij zal gebruik gemaakt worden van de resultaten uit de Case Study. Aangezien hier vooral ingegaan is op het selecteren van locaties met filegolven zal alleen dit onderdeel geëvalueerd kunnen worden.

6.2 Locatieselectie

De locatieselectie bestaat uit een globale selectie, een detailanalyse en het bepalen van de oplosbaarheid. De verschillende onderdelen zullen achtereenvolgens in deze paragraaf geëvalueerd worden.

6.2.1 Globale selectie van locaties met filegolven

Het selecteren van trajecten waar filegolven optreden op basis van de i/c verhouding bleek een goede manier om een globale selectie te maken. Van tien willekeurige trajecten is data in Monigraph verwerkt. Op acht trajecten traden filegolven op. Om een beter beeld te krijgen van de circa 100 trajecten die geselecteerd zijn, zal van meer trajecten data in Monigraph verwerkt moeten worden. Alle trajecten die door Transpute aangemerkt zijn als filegolflocatie vallen ook binnen deze selectie. Als van alle trajecten data verwerkt is, kan er onderscheid gemaakt worden in trajecten met en zonder filegolven en kan de hoogte van de i/c verhouding mogelijk worden bijgesteld, zodat de selectie verbeterd wordt.

Ten aanzien van de bruikbaarheid van de i/c verhoudingen methode zal de selectie van locaties makkelijker worden als het aantal rijstroken van een wegvak standaard in de InWeVa-database vermeld stond.

6.2.2 Detailanalyse van locaties met filegolven

In de detailanalyse was het goed mogelijk om filegolven te identificeren op basis van snelheid, intensiteit en golfsnelheid. De plaatjes die volgden uit de identificatie kwamen overeen met de snelheid- en intensiteit-contourplots die volgden uit Monigraph. Het nadeel was dat dit een groot aantal kleine filegolven opleverde die in de praktijk samen één filegolf vormden. Voor het bepalen van de oplosbaarheid maakt dit geen verschil, maar het kan een onjuist beeld geven van het aantal filegolven op een traject. Het totaal aantal voertuigverliesuren kan hierbij een beter beeld geven.

Aangezien de snelheden in filegolven onnauwkeurig zijn, werd de snelheid in de filegolf in eerste instantie bepaald op basis van de toestand stroomafwaarts van de filegolf, de intensiteit in de filegolf en de golfsnelheid. Vooral in de tijdstappen waarin de filegolf net ontstaat, klopt deze berekening niet. Doordat het gebied stroomafwaarts van de

filegolf soms erg klein was, volgden daaruit erg lage waarden voor de intensiteit en snelheid, waardoor de dichtheid in de filegolf erg laag werd (soms zelfs negatief). Omdat dit niet overeen komt met de werkelijkheid is besloten om de dichtheid in de filegolf toch te bepalen op basis van gemeten snelheden. In vergelijking tot andere evaluaties van filegolven kwam het aantal voertuigverliesuren overeen met de resultaten in de Case Study.

Om het effect van toeritdosering te kunnen bepalen zijn de toeritintensiteiten bepaald door het verschil te berekenen tussen de eerste lus stroomopwaarts en de eerste lus stroomafwaarts van de toerit. Doordat er niet altijd een lus aanwezig was tussen de afrit en toerit was het echter niet altijd mogelijk om de toeritintensiteit vast te stellen. Op deze toeritten kon het effect van toeritdosering niet bepaald worden. Om dit te voorkomen zouden lussen op de toerit de intensiteiten kunnen meten.

6.2.3 Bepalen van de oplosbaarheid van filegolven

Het bepalen van de oplosbaarheid van filegolven met dynamische maximumsnelheden gecombineerd met toeritdosering gaf goed inzicht in de mogelijke winst in VVU die er op een traject valt behalen. Ook was er een verschil te zien tussen verschillende combinaties van snelheidslimieten en doseringsgraden. Hoewel de verschillen in winst tussen de verschillende doseringsgraden klein zijn zorgt de combinatie met toeritdosering ervoor dat er extra filegolven opgelost kunnen worden en filegolven rondom toeritten ook opgelost kunnen worden. Door de aanwezigheid van staande files rondom de toeritten en lage toeritintensiteiten op andere toeritten bleef het verschil echter beperkt. In paragraaf 6.3 zal verder ingegaan worden op de evaluatie van de regeling die gebruikt is om de oplosbaarheid te bepalen.

Bij het bepalen van de oplosbaarheid zijn een aantal aannames gedaan die hieronder zullen worden besproken.

Door onderscheid te maken tussen de toestand stroomafwaarts van de toerit en stroomopwaarts van de toerit komt het regelschema beter overeen met de werkelijkheid. De toestand stroomopwaarts van de toerit is echter niet altijd homogeen bij aanwezigheid van een afrit, waardoor het regelschema stroomopwaarts van de toerit niet helemaal realistisch is. Hoewel dit niet bepalend is voor de oplosbaarheid kunnen de locaties van de snijpunten van het regelschema wel bepalend zijn voor de oplosbaarheid. Het regelschema moet namelijk geheel geconstrueerd worden in een gebied dat in vrije afwikkeling is.

De toestand die na toepassing van toeritdosering wordt bereikt, wordt berekend door de intensiteit op de hoofdrijbaan te verminderen met de hoeveelheid verkeer die door toeritdosering wordt tegengehouden. Als er echter geen lus aanwezig is tussen de afrit en de toerit, zijn de berekende intensiteiten onjuist en kan er geen uitspraak gedaan worden over de winst die met toeritdosering valt te behalen. Het gevolg voor de resultaten is dat de mogelijke winst rondom een aantal toeritten te laag wordt geschat. Er is echter geen rekening gehouden met een maximale lengte van de wachtrij op de toerit en de vertraging die het verkeer op de toerit op kan lopen. Hierdoor kan de winst in VVU in werkelijkheid lager zijn.

Ook is er geen rekening gehouden met een mogelijke meetvertraging. Als de meetvertraging toeneemt, zal de winst in VVU afnemen. De meetvertraging is afhankelijk van de benadering die gekozen wordt.

Filegolven worden alleen geïdentificeerd op een locatie waar een lus ligt en het gebied in vrije afwikkeling is ook gebaseerd op locaties van lussen. Als er een toerit aanwezig is tussen de staart van de file en het gebied in vrije afwikkeling wordt het regelschema mogelijk niet realistisch geconstrueerd en kan er mogelijk toeritdosering toegepast worden. Dit is niet meegenomen.

Een kanttekening bij de identificatie en het bepalen van de oplosbaarheid van filegolven is dat de gebruikte berekeningen in Matlab alleen toepasbaar zijn aan de rechterkant van de weg, bij oplopende hectometrering. Voor de andere rijrichting zullen er enkele aanpassingen gedaan moeten worden, maar kan gebruik gemaakt worden van hetzelfde principe.

6.2.4 Rangschikking

Als beide trajecten met elkaar vergeleken worden is er een duidelijk verschil te zien. Hoewel de mogelijke winst op de A2 hoger is dan op de A15 kan er op de A15 procentueel meer winst behaald worden. Dit komt overeen met de voorspelling dat bij een hogere frequentie van filegolven minder filegolven opgelost kunnen worden. Er kan ook gekeken worden naar het aantal filegolven dat opgelost is. Dit geeft echter een onjuist beeld, omdat bij dit aantal ook filegolven zitten die al uit zichzelf opgelost waren.

6.3 Maatregelspecificatie

De maatregelspecificatie moet vooral inzicht geven hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden. Voordat de maatregel in de praktijk toegepast kan worden zal het algoritme echter nog verder uitgewerkt moeten worden en zullen de parameters afgesteld moeten worden met behulp van een voorspellingsmodel. In de maatregelspecificatie wordt wel inzicht gegeven hoe lang het traject ongeveer moet zijn en welke benadering mogelijk geschikt is voor dit traject. Dit kan afgeleid worden uit de resultaten van de locatieselectie. Aangezien de gekozen benadering (MPC) nog nooit in de praktijk is toegepast zullen een simulatiestudie en praktijktest noodzakelijk zijn om het effect op de doorstroming te kunnen bepalen.

De regeling die in paragraaf 3.4 ontwikkeld is, waarbij dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering is getest in de Case Study bij het bepalen van de oplosbaarheid. Hoewel het effect op het aantal VVU beperkt zichtbaar was, is deze regeling mogelijk ook in de praktijk toepasbaar en kan gezien worden als een uitbreiding van het Specialist-algoritme. Er zijn echter nog een aantal aanpassingen nodig zoals het meenemen van alle toe- en afritten op een traject in plaats van alleen de meest stroomafwaartse toerit. Hierdoor zal het regelschema beter overeenkomen met de werkelijke situatie en kunnen filegolven beter opgelost worden. Hiervoor zijn echter wel metingen van intensiteiten op de toe- en afritten noodzakelijk. Om het effect van toeritdosering te vergroten zullen ook

de staande files rondom de toeritten aangepakt moeten worden. Dit is goed mogelijk met dynamische maximumsnelheden gecombineerd met toeritdosering. Er zal daarvoor meer onderzoek gedaan moeten worden naar het oplossen van staande files door de instroom te beperken. In de praktijk kan de regeling met toeritdosering er ook voor zorgen dat er geen nieuwe files ontstaan na het oplossen van de filegolf. Als er geen toeritdosering wordt toegepast en een filegolf lost stroomopwaarts van de toerit op, dan kan de verhoogde uitstroom een nieuwe filegolf veroorzaken. Door toeritdosering toe te passen kan dit voorkomen worden.

Een nadeel van de regeling met toeritdosering is dat het regelschema ingewikkelder wordt en er extra voorwaarden gesteld moeten worden aan de snijpunten van de verschillende toestanden om onrealistische regelschema's te voorkomen.

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was om een methode te ontwikkelen voor de selectie van geschikte locaties voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden en waarmee de maatregel zo uitgewerkt wordt dat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt. Met het verbeteren van de doorstroming wordt bedoeld dat het aantal voertuigverliesuren zoveel mogelijk beperkt wordt. Een verbeterde doorstroming mag echter niet ten koste gaan van de verkeersveiligheid of het milieu.

Hieronder worden de onderzoeksvragen beantwoord op basis waarvan de methode is ontwikkeld.

- 1. Wat zijn de verschillen in de benadering van dynamische maximumsnelheden en wat is het effect op de doorstroming?*
Het verschil in benadering van dynamische maximumsnelheden wordt vooral bepaald door de regelfilosofie die gebruikt wordt. Mogelijke regelfilosofieën zijn homogeniseren, instroombeperking en snelheidsverhoging. Elke regelfilosofie heeft echter een ander effect op de doorstroming.
 - Homogeniseren: hierbij worden snelheden gebruikt rond de kritische snelheid, waardoor het ontstaan van congestie uitgesteld kan worden. Bij verschillende experimenten is echter geen verbeterde doorstroming geconstateerd.
 - Instroombeperking: de instroom kan beperkt worden door de toepassing van dynamische maximumsnelheden al dan niet gecombineerd met toeritdosering. Met deze benaderingen kunnen filegolven of staande files bij toeritten opgelost of zelfs voorkomen worden. Bij toepassing van voorspellende benaderingen moet echter rekening gehouden worden met de toename van de rekestijd, waardoor de effectiviteit van het algoritme af kan nemen.
 - Snelheidsverhoging: Bij doorstromingsproblemen in 80-km zones kan een snelheidsverhoging in de randen van de spits bijdragen aan het verbeteren van de doorstroming, doordat er meer ruimte ontstaat voor weefbewegingen.
- 2. Onder welke omstandigheden op een locatie kunnen dynamische maximumsnelheden een positief effect hebben op de doorstroming?*
Er zijn verschillende verkeerssituaties waarbij dynamische maximumsnelheden effectief kunnen zijn. Dit zijn filegolven,

staande files bij toeritten en doorstromingsproblemen in 80 km-zones.

- *Filegolven*: hierbij propageert de kop van de file met een snelheid van 18 km/u stroomopwaarts. Voor het oplossen van filegolven moet een instroombeperkende regelfilosofie gebruikt worden. Als de intensiteiten op toeritten te hoog worden zal een combinatie van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering noodzakelijk zijn om een zo hoog mogelijk doorstroming te behalen.
- *Staande files bij toeritten*: één van de kenmerken van dit type file is dat de kop van de file op dezelfde locatie blijft. Ook hier zal een instroombeperkende regelfilosofie toegepast moeten worden, waarbij dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering.
- *Doorstromingsproblemen in 80 km-zones*: bij 80 km-zones, waarbij weefbewegingen moeilijker verlopen door homogeen rijgedrag kan een maatregel zoals op de A12 bij Voorburg overwogen worden. Door de snelheid te verhogen ontstaat er meer ruimte voor weefbewegingen.

Over het algemeen kunnen dynamische maximumsnelheden alleen effectief worden toegepast als het verkeer in de metastabiele toestand verkeert, omdat hierdoor geen nieuwe verstoringen kunnen ontstaan, maar juist verstoringen opgelost kunnen worden.

3. *Welke factoren kunnen van invloed zijn op de impact van dynamische maximumsnelheden?*

Naast de regelfilosofie (deelvraag 1) en de verkeerssituatie (deelvraag 2) zijn de weglay-out en de manier van handhaven bepalend voor de impact van dynamische maximumsnelheden

- *Weglay-out*: Bij de aanwezigheid van toeritten met hoge intensiteiten moeten dynamische maximumsnelheden gecombineerd worden met toeritdosering. Ook moet rekening gehouden worden met de grootte van het netwerk waarover dynamische maximumsnelheden worden toegepast. Bij voorspellende benaderingen neemt hierbij de rekentijd toe.
- *Handhaving*: de manier van handhaven kan van invloed zijn op het effect van dynamische maximumsnelheden. Een lagere snelheidslimiet zonder strikte handhaving kan hetzelfde effect hebben als een hogere snelheidslimiet met strikte handhaving.

4. *Op basis van welke criteria kunnen geschikte locaties worden geselecteerd voor de toepassing van dynamische maximumsnelheden?*

De criteria die gebruikt worden voor het selecteren van geschikte locaties verschillen per type file. Ook worden er in de

verschillende fasen van de locatieselectie (globale selectie, detailanalyse, oplosbaarheid en rangschikking) andere criteria gebruikt.

5. *Op welke manier kunnen dynamische maximumsnelheden toegepast worden om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren?*

De manier waarop dynamische maximumsnelheden toegepast moeten worden volgt uit de literatuurstudie. In de maatregelspecificatie wordt beschreven hoe afhankelijk van de situatie een geschikte benadering gekozen kan worden en hoe de maatregel verder uitgewerkt kan worden zodat de doorstroming zoveel mogelijk verbeterd wordt.

6. *Hoe kunnen de effecten van dynamische maximumsnelheden van tevoren voorspeld worden?*

In de methode wordt bij het bepalen van de oplosbaarheid en mogelijke uitstel van files een voorspelling gedaan van de mogelijke winst in voertuigverliesuren. Op basis van deze winst kunnen de locaties worden gerangschikt.

Het effect van dynamische maximumsnelheden kan echter beter voorspeld worden door middel van een simulatiestudie of een praktijktest. Ook kunnen op deze manier exacte drempelwaarden en parameters van een benadering gesteld worden.

Hieronder zullen de verschillende onderdelen uit de methode worden toegelicht.

Globale selectie

Bij de globale selectie worden locaties met filegolven geselecteerd op basis van de i/c verhouding op een traject. Bij een staande file is vooral de locatie van de file en de lengte van de file belangrijk. De globale selectie van 80 km-zones zal gebaseerd zijn op de aanwezigheid van bottlenecks in 80 km-zones.

Detailanalyse

De detailanalyse bestaat uit het verwerken van data in Monigraph, waarna de verschillende typen files kunnen worden geïdentificeerd. Filegolven worden geïdentificeerd op basis van intensiteiten, snelheden en de golfsnelheid. Staande files worden ook geïdentificeerd op basis van intensiteiten en snelheden. Doorstromingsproblemen in 80 km-zones kunnen waargenomen worden door te kijken naar de spreiding in snelheden en het verschil in dichtheid tussen de rijstroken.

Na de identificatie worden de toestanden rondom de file bepaald. Dit vormt de input voor het bepalen van de oplosbaarheid.

Oplosbaarheid en rangschikking

De rangschikking van locaties wordt bepaald op basis van de oplosbaarheid of mogelijke uitstel van files en de mogelijke winst in voertuigverliesuren. Op deze manier kan van tevoren een schatting

gemaakt worden van het effect van dynamische maximumsnelheden op de doorstroming (deelvraag 6).

Bij filegolven en staande files bij toeritten wordt de oplosbaarheid gecontroleerd door het regelschema te construeren op basis van schokgolftheorie. Uit de case study bleek dat de procentuele winst in VVU lager is bij een hogere frequentie van filegolven. Verder was het effect van toeritdosering beperkt door lage intensiteiten op toeritten en de aanwezigheid van staande files rondom toeritten.

Bij 80 km-zones zal nog meer onderzoek gedaan moeten worden naar de verkeerssituatie die ontstaat bij een tijdelijke verhoging van de maximumsnelheid om de mate van uitstel te kunnen bepalen.

Maatregelspecificatie

Bij filegolven en staande files bij toeritten is een instroombeperkende regelfilosofie noodzakelijk om de doorstroming zoveel mogelijk te verbeteren. Afhankelijk van de aanwezigheid van toeritten en de intensiteit op de toeritten is een combinatie van dynamische maximumsnelheden met toeritdosering noodzakelijk.

Naast de benaderingen uit de literatuurstudie is de in paragraaf 3.4 ontwikkelde regeling ook geschikt om in de praktijk filegolven op te lossen. Deze regeling kan ook toegepast worden op trajecten met veel toe- en afritten. Uit de case study blijkt dat er meer filegolven opgelost kunnen worden en de winst in VVU toe kan nemen bij een combinatie met toeritdosering. De winst is echter beperkt door de aanwezigheid van staande files rondom toeritten en lage intensiteiten op toeritten. Na het oplossen van een filegolf kan toeritdosering tevens voorkomen dat er een nieuwe filegolf ontstaat als gevolg van de verhoogde uitstroom. In 80 km-zones kan gebruik gemaakt worden van een snelheidsverhoging in de randen van de spits om de doorstroming te verbeteren.

Om de lengte van het traject te kunnen bepalen kan gekeken worden naar de afstand waarover de file zich verplaatst en het traject dat nodig is om de file op te lossen.

De effectieve snelheidslimiet is afhankelijk van de mate van handhaving.

7.2 Aanbevelingen

In deze paragraaf zullen voor de verschillende onderdelen uit het onderzoek aanbevelingen worden gedaan. Een deel van deze aanbevelingen volgt uit de bestudeerde literatuur. Een ander deel van aanbevelingen volgt uit de case study waarin de ontwikkelde methode voor filegolven is getest.

Globale selectie

Om de globale selectie van trajecten met filegolven makkelijker te maken wordt aanbevolen om in de database met intensiteiten ook meteen het aantal rijstroken te vermelden. Dit maakt het berekenen van de i/c verhoudingen makkelijker.

Verder wordt aanbevolen om meer trajecten uit de globale selectie te analyseren met behulp van Monigraph en aan de hand daarvan de i/c verhouding bij te stellen. Hiermee kan de selectie verbeterd worden.

Als de VIA-tool beschikbaar komt, waarin statische verkeersgegevens per minuut verzameld worden, wordt aanbevolen om hiervan gebruik te maken. Op basis van de drempelwaarden voor intensiteit per strook, snelheid, en golfsnelheid zoals gebruikt in de detailanalyse kan dan eenvoudiger een globale selectie gemaakt worden van trajecten met filegolven.

Voor de globale selectie van locaties waar staande files optreden zal eerst meer onderzoek gedaan moeten worden naar de kenmerken waarbij staande files oplosbaar zijn en hoe ze geïdentificeerd kunnen worden. Er kan vervolgens bijvoorbeeld op basis van een maximale filelengte en locatie van de bottleneck een globale selectie gemaakt worden.

Detailanalyse en oplosbaarheid

Aangezien de snelheden in filegolven niet nauwkeurig te meten zijn en de snelheid ook niet realistisch berekend kon worden op basis van de toestand stroomafwaarts van de filegolf, de intensiteit in de filegolf en de golfsnelheid wordt aanbevolen om gebruik te maken van de capaciteitsval om de toestanden te berekenen. Hiermee kan niet alleen het aantal VVU nauwkeuriger berekend worden, maar kan het regelschema ook beter worden geconstrueerd en de oplosbaarheid beter worden voorspeld.

Om de oplosbaarheid van een filegolf beter te kunnen bepalen moet verder in detail gekeken worden naar de toestand van de filegolf op het moment dat deze een toerit passeert. In de methode is aangenomen dat de toestand stroomopwaarts van de toerit gelijk is aan de toestand stroomafwaarts van de toerit. Het is echter niet duidelijk of dit in de praktijk ook het geval is.

Voor de identificatie van staande files moet in meer detail gekeken worden naar de kenmerken van de files. Op basis van gemeten intensiteiten en snelheden kunnen vervolgens drempelwaarden voor de identificatie worden vastgesteld.

Ook zal er meer onderzoek gedaan moeten worden naar de reden van het verschil in capaciteitsval tussen staande files en filegolven. Dit kan informatie geven over de oplosbaarheid van staande files.

Om het effect van toeritdosering bij het oplossen van staande files en filegolven te kunnen bepalen is nauwkeurige informatie nodig van intensiteiten op de toerit. De beste manier om deze intensiteiten te meten is door middel van detectielussen op de toerit. Deze lussen zijn echter niet overal aanwezig. Er wordt dan ook aanbevolen om deze lussen aan te leggen.

Bij 80 km-zones kunnen de resultaten van de proef op de A12 bij Voorburg gebruikt worden om de effecten van deze maatregel vast te stellen. Vervolgens kan de 80 km/u situatie vergeleken worden met de situatie met een dynamische snelheidslimiet. Dit moet inzicht geven in de verandering van de spreiding van snelheden, de intensiteiten waarbij congestie ontstaat en de spreiding van het verkeer over de rijstroken. Aan de hand van deze kenmerken kan de mogelijke uitstel van congestie op andere locaties vastgesteld worden.

Maatregelspecificatie

Om de regeling met dynamische maximumsnelheden geschikt te maken voor trajecten met hoge intensiteiten op de toeritten is het belangrijk om onderscheid te maken tussen de toestand stroomafwaarts en stroomopwaarts van een toerit. In de ontwikkelde regeling is echter alleen rekening gehouden met de eerste toerit stroomopwaarts van de filegolf. Voor de verbetering van de regeling wordt aanbevolen om ook rekening te houden met de aanwezigheid van afritten en andere toeritten die verder stroomopwaarts liggen. Hiervoor zijn wel gegevens noodzakelijk van intensiteiten op toe- en afritten.

Om het effect van toeritdosering te vergroten wordt aanbevolen om ook de staande files rondom toeritten aan te pakken. Dit kan mogelijk ook met dynamische maximumsnelheden gecombineerd met toeritdosering.

Voor de toepassing van toeritdosering in de praktijk wordt aanbevolen om gebruik te maken van informatie van een detectielus stroomafwaarts van de toerit. In Nederland wordt toeritdosering ingeschakeld op basis van gegevens van de detectielus stroomopwaarts van de toerit. Om filegolven succesvol op te kunnen lossen, moet het ontstaan van een filegolf echter stroomafwaarts van de toerit gedetecteerd worden.

Verder wordt aanbevolen om een feedback regeling te gebruiken, zowel bij een regeling met en een regeling zonder toeritdosering. Bij een feedback regeling wordt de regeling aangepast als de verkeerssituatie stroomopwaarts van de filegolf verandert. Bij een feedforward-regeling, zoals bij Specialist is dit niet het geval.

Referenties

Carlson, R.C., Papamichail, I., Papageorgiou, M., Messmer, A. (2009), *Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks*, Transportation Res. Part C, doi: 10.016/j.trc.2009.05.014.

Cremer, M. (1979), *Der Verkehrsfluß auf Schnellstrassen*, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1979.

DHV Milieu en Infrastructuur (2003), *Eindevaluatie "SlimRijden" Verkeerskundige- en weggebruikersevaluatie*, in opdracht van RWS-AVV, juni 2003, Dossier T0825-04.001/V1098-01.001.

Dixon, C., Rees, T. (2005), *Monitoring of the M25 Controlled Motorway 2002-2003*, rapport, Transport Research Laboratory, in opdracht van SSR Division, Highways Agency.

Ghods, A.H., Kian, A.R., Tabibi, M. (2009), *Adaptive Freeway Ramp Metering and Variable Speed Limit Control: A Genetic Fuzzy Approach*, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 1 (1), 27-36.

Grontmij (2002), *Optimalisatie parameterinstellingen AID*, in opdracht van RWS-AVV, De Bilt, januari 2002, V&I – 99311640.

Hanckmann, G., (1998), *Verkeerssignalering in Aimsun 2*, NHTV afstudeerverslag in opdracht van DHV, Amersfoort, mei 1998.

Harbord, B., White, J., McCabe, K., Riley, A., Tarry, S. (2006), *A flexible approach to motorway control*, Atkins, ITS World Congress, 2006.

Harms, H.J. (2006), *80 km/u vertraagt? De oorzaken van de toename in filezwaarte na invoering van de 80 km/u maatregel*, afstudeerrapport, TU Delft, Transport en Planning.

Hegy, A., De Schutter, B., Hellendoorn, H. (2005), *Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits*, Transportation Research Part C 13 (3), 185-209.

Hegy, A., De Schutter, B., Hellendoorn, J. (2005), *Optimal Coordination of Variable Speed Limits to Suppress Shock Waves*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 6 (1), 102-112.

Hegy, A., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Van Katwijk, R.T. (2007), *Testbed selection for the Transumo/ATMA sub-project Integrated Model Predictive Control (IMPRc)*, Delft Center for Systems and Control, TU Delft.

Hegy, A., Hoogendoorn, S.P., Schreuder, M., Stoelhorst, H., Viti (2008), *SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory*, Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Beijing, China, October 12-15, 2008.

Hegy, A., Hoogendoorn, S.P. (2010), *Dynamax voor doorstroming – SPECIALIST op de A12: inregelen en evaluatie, eindrapportage*, 9 mei 2010, TU Delft, Afdeling Transport en Planning, in opdracht van Rijkswaterstaat – Dienst Verkeer en Scheepvaart.

Highway Agency (2004), *M25 Controlled Motorways Summary Report*, Issue 1, November 2004.

Hoogendoorn, S.P. (2007), *Dynamische snelheidsmaatregelen: Evaluatie en workshop, Deelrapport Evaluatiemethode*, Technische Universiteit Delft, in opdracht van RWS-AVV, 2007.

Hoogendoorn, S.P. (2008), *Dynamische snelheidsmaatregelen: Evaluatie en workshop*, Technische Universiteit Delft, in opdracht van RWS-AVV, januari 2008.

Hoogendoorn, S.P. (2007), *Traffic Flow Theory and Simulation*, dictaat CT4821, Technische Universiteit Delft.

Hoogendoorn, S.P., Hegyi, A. (2008), *Het oplossen van filegolven: een dynamische snelheidslimieten-regeling voor Dynamax, data-analyse, ontwerp en specificatie van het SPECIALIST algoritme*, Technische Universiteit Delft, in opdracht van Rijkswaterstaat – AVV, juni 2008.

Kerner, B. (2001), *Complexity of synchronized flow*, Networks and Spatial Economics 1 (1/2), 35-76 (2001).

Lighthill, M.J., Whitham, G.B. (1955), *On kinematic waves, II. A theory of traffic flow on long crowded roads*, Proceedings of the Royal Society, vol. 229A, no. 1178, pp. 317-345, May 1955.

Lin, P., Kang, K., Chang, G (2004), *Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations*, Intelligent Transport Systems, 8:1-14.

Meijer, W., Krootjes, P. (2005), *Verkeerssignalering en microsимулатie*, Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2005.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2008), *Beleidskader Benutten. Eén van de pijlers voor een betere bereikbaarheid*.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, AVV (2007), *Evaluatie 80 km zones*. Eindrapportage 2007.

Papageorgiou, M., Blosseville, J., Hadj-Salem, H. (1998), *La fluidification des rocades de l'Île de France: Un projet d'importance*, Technical Report, Dynamic Systems and Simulation Laboratory,

Technical University of Crete, Chania, Greece, Internal Report No. 1998-17.

Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., Papamichail, I. (2008), *Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2047, Washington D.C., pp 37-48.

Papamichail, I., Kampitaki, K., Papageorgiou, M., Messmer, A. (2008), *Integrated Ramp Metering and Variable Speed Limit Control of Motorway Traffic Flow*, Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

Popov, A., Babuska, R., Hegyi, A., Werner, H. (2008), *Distributed Controller Design for Dynamic Speed Limit Control Against Shock Waves on Freeways*, Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

Sanders, F.M., Van Nes, R. (2004), *dictaat ruimtelijke vervoersplanning*, TU Delft, Faculteit CiTG.

TNO (2006), *Investigation into dynamic speed limits in the Netherlands*, Delft, September 2006.

TNO (2010), *Evaluatie dynamisering maximumsnelheden*, in opdracht van Rijkswaterstaat – Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft, 10 juni 2010.

Transpute (2002), *Onderzoek modificatie AID – Advies*, in opdracht van RWS-AVV, Gouda, april 2002.

Transpute (2008), *Filegolven, lopende golven van fileverkeer op snelwegen. Beschrijving van het verschijnsel en voorstel voor een remedie*, in opdracht van Dienst Verkeer en Scheepvaart, Rijkswaterstaat, Amersfoort, 28 maart 2008.

Zackor, H. (1991), *Speed Limitation on Freeways: Traffic-Responsive Strategies*, In *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*, (M. Papageorgiou, ed.), Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1991, pp. 507–511.

DYVERS (DYnamische VERlaging maximumSnelheden)

Van september 2002 tot april 2003 vond er op het traject op de A1 tussen het knooppunt Beekbergen (A1-A50) en de aansluiting Deventer een proef met dynamische maximumsnelheden plaats met als doel het beter benutten van de bestaande wegcapaciteit door de verkeersstroom te homogeniseren. Het traject had een lengte van 12,9 kilometer en heeft over de hele lengte twee rijstroken per richting, waar een maximale snelheid geldt van 120 km/u. Er is voor deze locatie gekozen, omdat er regelmatig files optreden en het traject representatief is voor een groot aantal wegen van het Nederlandse wegennet. Op het gehele traject was een MTM-systeem aanwezig met de nieuwste generatie matrixsignaalgevers.

Als er file dreigde te ontstaan werd er een aangepaste maximumsnelheid van 100 of 80 km/u getoond. Deze snelheden worden rijbaanbreed getoond en zijn voorzien van een rode rand. De snelheid wordt gehandhaafd door middel van trajectcontrole. Indien er toch file ontstaat, schakelt het systeem over op de aanwezige AID. In de evaluatie is alleen de avondspits meegenomen, omdat er in de ochtendspits niet of nauwelijks congestie optrad. In de avondspitsperiode zijn de gemiddelde snelheden licht gedaald ten opzichte van de voormeting. Voor drie van de vijf meetpunten is deze afname significant. Uit een kleinere spreiding van de snelheden kan afgeleid worden dat het verkeer homogener is geworden tegen iets lagere gemiddelde snelheden.

Het experiment geeft geen eenduidig effect ten aanzien van de verkeersafwikkeling. De gewenste homogenisering van het verkeer treedt wel op, dit leidt echter niet tot een verbeterde doorstroming van het verkeer, maar wel tot vermindering van de filevorming. De betrouwbaarheid van alle onderzochte indicatoren met betrekking tot de verkeersafwikkeling is aanmerkelijk beter geworden.

Het proces van tijdverlies 'nemen' voordat de file ontstaat en filetijdwinst 'terugverdienen' levert per saldo geen verbetering op in gemiddelde snelheid en reistijd in deze proefsituatie. Wel geeft het positieve impulsen ten aanzien van de betrouwbaarheid, de milieubelasting en de verkeersveiligheid.

Aangezien Dyvers gericht is op homogeniseren en niet gezorgd heeft voor een significante verbetering van de doorstroming is deze benadering minder geschikt om breder toegepast te worden. Verder zijn er geen gegevens meer beschikbaar van het gebruikte algoritme, waardoor het moeilijker wordt om de benadering te reproduceren.

Snelheidsdekens

In 2006 en 2007 hebben op 12 trajecten proeven plaatsgevonden met snelheidsdekens. Snelheidsdekens zijn (onderdeel van) regelscenario's waarbij voor of tijdens congestie een maximumsnelheid van 70 km/u of 90 km/u wordt opgelegd over een (vast) traject. Hiermee wordt het

verkeer gehomogeniseerd om zo de doorstroming en de betrouwbaarheid te verbeteren.

In Tabel I - 1 zijn de kenmerken van de snelheidsscenario's voor de beschouwde trajecten weergegeven. Er kunnen drie verschillende typen dekens worden onderscheiden. Bij 70- en 90- dekens wordt de aangepaste snelheid getoond voor het optreden van congestie. Bij een 70/90-deken wordt er voor het optreden van congestie 90 km/u op de signaalgevers getoond en als er al congestie is opgetreden wordt een deken van 70 tussen de reguliere AID signalen getoond.

Tabel I - 1: Kenmerken snelheidsscenario's voor de beschouwde trajecten

Traject	Locatie	Spits	Max. snelheid	Traject controle	# rij-stroken	Interne bottleneck	Type	Op tijd (%)	Trigger
1	A28	AS	120	nee	2	ja	70	25%	-
2	A2	AS	120	nee	2	ja	70/90	20%	-
4	A2	OS	120	nee	3	ja	90	95%	-
5	A2	OS	120	nee	3	ja	90	90%	-
6	A12	OS	100	nee	3	ja	70/90	50%	v
7	A50	AS	120	nee	2	ja	70/90	60%	v
8	A12	OS	100	nee	2	ja	70/90	95%	q/v
9	A20	OS	100	ja	3	nee	70/90	80%	q/v
10	A13	OS	100	ja	3	ja	70/90	75%	q
11	A12	OS	120	nee	3	ja	90	75%	q
12	A13	AS	100	ja	3	ja	70/90	70%	q

Er wordt onderscheid gemaakt tussen dekens die op basis van een vast tijdsvenster worden ingeschakeld (-) en dekens die werken met een snelheids- (v) en/of intensiteitstrigger (q). De wegverkeersleider doet een visuele controle op grond van camerabeelden en checkt of de inzet van de maatregel niet tot andere problemen zal leiden. De snelheidsmaatregel wordt vervolgens handmatig ingezet. Voor het tonen van de aangepaste snelheidslimieten wordt gebruik gemaakt van de bestaande matrixsignaalgevers. Voor de dataverzameling en analyse wordt er gebruik gemaakt van inductielussen, Monica, Monigraph en Matlab. Trajectcontrole impliceert dat ergens op het traject (meestal aan het einde) sprake is van trajectcontrole. In geen geval is er dus sprake van trajectcontrole voor het hele traject.

De effecten van de maatregel is op de beschouwde trajecten verschillend: soms wordt de maatregel als positief en soms wordt de maatregel als negatief ervaren door de wegverkeersleiders en de verkeerskundige experts in de verkeerscentrale.

Uit de analyse bleek dat de dekens in veel gevallen te laat werden ingeschakeld. Dit blijkt vooral het geval indien er gebruik gemaakt is van vaste tijdsvensters of van snelheidstriggers. Bij het te laat inschakelen heeft het gebruik van de deken geen effect op het uitstellen van het ontstaan van congestie.

Er kan geconcludeerd worden dat de dekens een aantoonbaar effect hebben op de doorstroming. Hoewel er geen sprake is van strikte naleving, resulteert bij vrije verkeersafwikkeling de deken in een aanzienlijke reductie van de gerealiseerde snelheden. Verder is er een (beperkte) reductie in de spreiding van vrije snelheden. De snelheidsdekens hebben dus een homogeniserende werking: er is

sprake van een afname in snelheden in ruimtelijke zin en van een afname in de plaatselijke snelheidsverschillen (spreiding). Bij trajectcontrole inclusief handhaving worden de maximumsnelheden strikt nageleefd. Dekens hebben in deze situatie een (beperkt) effect op de rijsnelheid.

De effecten van de deken op de vrije capaciteit zijn (met enige aarzeling) positief te noemen: weliswaar kan voor geen enkel traject een statistisch verschil worden aangetoond tussen de situaties met en zonder deken, maar veruit de meeste resultaten per traject wijzen in de richting van een positief effect op de capaciteit. Dit geldt ook voor de afrijcapaciteit. Voor nagenoeg alle trajecten is er een (beperkte) toename van de uitstroomcapaciteit van filegolven. Dit resulteert in een hogere kans dat filegolven verdwijnen.

Een kwalitatieve beschouwing van de congestiefrequentie geeft aan dat er een afname lijkt te zijn van de kans dat op een willekeurige locatie en tijd sprake is van file.

Uit de analyse blijkt verder dat er geen sterk verband is gevonden tussen de relatie verkeersintensiteit – reistijd en het aanwezig zijn van een snelheidsdeken. Voor vrije reistijden resulteert de deken in een beperkte toename van de reistijd. Bij congestie is dit verschil gemiddeld genomen verdwenen. Dit geldt eveneens voor de relatie vertraging, filelengte, filezwaarte, en verkeersintensiteit. Wel is er sprake van een positief verband tussen de (dag-tot-dag) spreiding in de reistijden en de aanwezigheid van een snelheidsdeken.

Er is geprobeerd op de invloedsfactoren op het efficiënt functioneren van de snelheidsdeken in kaart te brengen. Dit bleek echter niet goed mogelijk. Oorzaken hiervan zijn de beperkte hoeveelheid data, het grote aantal mogelijke (combinaties van) invloedsfactoren (reguliere maximumsnelheid, verkeerssamenstelling, percentage vrachtverkeer, aantal rijstroken, weggeometrie, omgevingsfactoren, etc.) en het beperkte aantal trajecten. De analyses die uitgevoerd zijn gaven dan ook geen eenduidig beeld.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat hoewel de snelheidsdekens een positief effect hebben op de capaciteit en de kans op file afgenomen lijkt te zijn er geen eenduidig beeld over de werking kan worden gegeven. Het algoritme is vooral gericht op homogeniseren en wordt vaak in vaste tijdvensters en niet altijd op tijd ingezet, waardoor het minder geschikt is om breder toegepast te worden. De snelheidsdekens hebben wel voor een verlaging van de gemiddelde snelheid gezorgd, maar het is de vraag of er vergelijkbare resultaten behaald worden met een striktere handhaving van de snelheden.

Corridor Management in Duitsland

Het doel van dit project was het verhogen van de veiligheid en de doorstroming om congestie te voorkomen.

Op de snelwegen A2, A3, A4, A5, A8 en A9 wordt de maximumsnelheid automatisch verlaagd naar 120 km/u of lager in stappen van 20 km/u door gebruik te maken van wegkantssystemen. Het systeem reageert op hoge verkeersintensiteiten, slechte weersomstandigheden en ongevallen. Om rijstrookwisselingen te voorkomen, wordt boven elke rijstrook dezelfde snelheid getoond. Inhaalverboden voor vrachtwagens, waarschuwingen voor slecht weer

en gevaarlijke verkeerssituaties worden door middel van signaalgevers boven de weg getoond. Dit zijn combinaties van maximumsnelheden, informatie (waarom de maatregel geldt) en secundaire doelen. Het effect van de maatregel is een homogenere verkeersstroom en een afname in reistijd in spitsuren. Verder is het aantal ongelukken afgenomen, voornamelijk door de waarschuwingen voor slechte weersomstandigheden en de verhoogde acceptatie van snelheidslimieten.

Aangezien ook deze maatregel gericht is op homogeniseren kan geconcludeerd worden dat de benadering minder geschikt is voor de bredere toepassing. Verder zijn er weinig gegevens over het algoritme en de eigenschappen van de locaties beschikbaar, waardoor het lastiger wordt om een uitspraak te doen over de bredere toepassing van deze benadering.

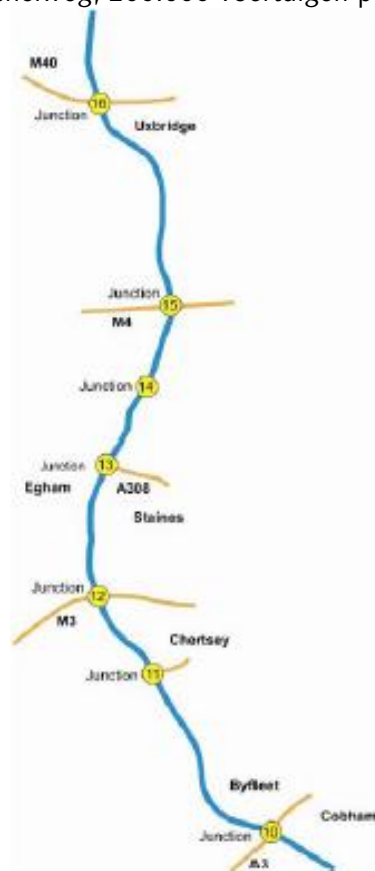
Dynamische maximumsnelheden op een gedeelte van de M25 in Londen

Het doel van deze maatregel is om de doorstroming te verbeteren, langzaam rijdend verkeer te voorkomen, rijstrookgebruik te optimaliseren, de betrouwbaarheid van reistijden te vergroten en de stress te verminderen.

De maximumsnelheden worden dynamisch aangepast op basis van de intensiteit en snelheid van het verkeer. De maatregel wordt toegepast op een gedeelte van 22 km van de London Orbital M25 (2x4 strooks snelweg, 200.000 voertuigen per dag) De data wordt naar een centraal

station gestuurd, waar de snelheidslimieten worden gecoördineerd. De snelheid verandert van 70 mph (112 km/u) naar 60 mph (96 km/u) als de intensiteit hoger is dan 1650 vtg/uur/strook en naar 50 mph (80 km/u) als de intensiteit hoger is dan 2050 vtg/uur/strook. Het systeem monitort ook snelheden en stationair verkeer en remmende voertuigen die een file naderen en zorgt ervoor dat er geen fluctuaties in de snelheidslimieten ontstaan. De HIOCC (HIGH OCCUPANCY INCIDENT DETECTION ALGORITHM) beschermt de staart van de file met een snelheidslimiet van 40 mph (64 km/u) ingeleid door 50 en 60 mph. De weggebruiker wordt door middel van borden geïnformeerd over de reden van de aangepaste snelheidslimieten. De snelheden worden gehandhaafd door middel van radars en camera's. De data wordt centraal geanalyseerd om een link te leggen tussen intensiteit en snelheid om het systeem te optimaliseren (trigger intensiteit en

Figuur I - 1: Overzicht traject M25 J10-J16 (Highway Agency, 2004)



minimale aan-tijden). De doorstroming tijdens de 5 uur durende ochtendspits nam toe met 1,5% per jaar. Dit kwam vooral door de afname van de afstand tussen voertuigen bij snelheden tot 80 km/u, de vermindering van het aantal filegolven van 7 per ochtendspits, tot 5 per ochtendspits en een minder strikte handhaving. De avondspits laat weinig verbetering zien. Verder is het gebruik van de linker rijstrook met 15% toegenomen, het aantal ongevallen is met 20% afgenomen en luchtvervuiling en geluidshinder zijn afgenomen. 90% van de weggebruikers is tevreden met het systeem. Het probleem is dat de betrouwbaarheid, veiligheid en milieuaantasting niet voldoende zijn geanalyseerd.

Deze benadering scoort bij de beoordeling minder goed op de punten doorstromingsverbetering en algoritme. De benadering is namelijk gericht op het homogeniseren van de verkeersstroom en heeft alleen in de ochtendspits een kleine verbetering laten zien.

Dynamax – A12 Bodegraven-Woerden

Op de A12 Zuidbaan, km 34,4 – 50,6 tussen Bodegraven en Woerden worden twee proeven gecombineerd: het regenalgoritme vanuit het verkeersveiligheidsperspectief en een doorstromingsalgoritme wanneer de verkeersafwikkeling dreigt te stagneren. Over het gehele traject bestaat de weg uit drie rijstroken met een maximumsnelheid van 120 km/u. Er zijn drie opritten: de N11, Nieuwerbrug en Woerden. In de meeste gevallen ontstaat er file bij de aansluiting met de N11. Deze files zijn staande files en kunnen niet worden opgelost met Dynamax. Na de bocht tussen Woerden en Harmelen ontstaan regelmatig filegolven die oplosbaar zijn met dynamische maximumsnelheden.

Figuur I - 2: Overzicht traject A12 Bodegraven-Woerden



De aangepaste maximumsnelheden worden via de signaalgevers met een rode rand weergegeven. De snelheden worden gehandhaafd door middel van reguliere handhaving. Verder staan er argumentatieborden tussen de signaalgevers in en mottoborden in de berm.

Als er een filegolf gedetecteerd wordt, worden de aangepaste snelheidslimieten aan de hand van het algoritme Specialist ingeschakeld. De theorie van Specialist is gericht op het beperken van de instroom, waardoor de filegolf op kan lossen. De lengte van het gebied waarin een snelheidslimiet geldt, is afhankelijk van de lengte van de file. In de ideale situatie zorgt het ervoor dat de file precies opgelost wordt. Stroomopwaarts van het gebied waar een snelheidslimiet geldt, heeft het verkeer dat instroomt dezelfde snelheid, maar een hogere dichtheid. De uitstroom van dit gebied heeft een intensiteit die hoger is en een hogere snelheid dan bij vrije doorstroming.

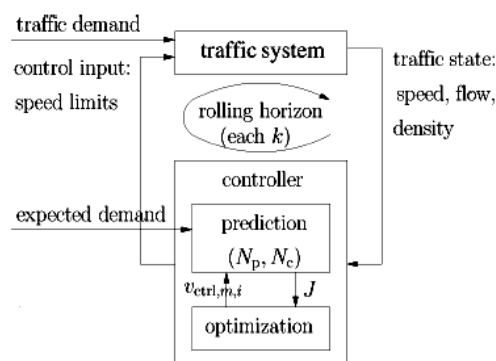
Uit de resultaten van de evaluatie van de proef blijkt dat het mogelijk is om filegolven op te lossen met dynamische maximumsnelheden, en dat daarbij het ontstaan van een nieuwe file voorkomen kan worden. Van de 242 ingrepen tijdens 149 dagen waarop het algoritme actief was, betrof het 48% van de gevallen filegolven en 52% van de gevallen (onbedoeld) andere type files. Het algoritme greep gemiddeld één keer op de tien filegolven in, waarvan ongeveer 80% is opgelost. Van de overige ingrepen is ongeveer 40% opgelost. Gemiddeld over alle ingrepen was er per ingreep een winst van 18 voertuigverliesuren (VVU), waaronder gemiddeld 35 VVU voor filegolven (gemiddeld over alleen de opgeloste filegolven: 39 VVU) en gemiddeld 2 VVU voor de overige ingrepen. De gemiddelde snelheid op de locaties waar 60 km/u is getoond was 79 km/u, met een standaarddeviatie van 16 km/u. Gezien het grote aantal toeritten op het hoofdwegennet zou de uitbreiding van de aanpak naar files bij toeritten, of zelfs de integratie met toeritdosering de toepasbaarheid ervan aanzienlijk vergroten.

Optimale coördinatie van variabele snelheidslimieten tegen filegolven

In dit theoretische model, ontwikkeld door Hegyi et al. (2005) wordt een methode voorgesteld om filegolven op te lossen. Als het verkeer een hoge dichtheid heeft kunnen er filegolven ontstaan. Deze filegolven zorgen voor een langere reistijd en plotselinge grote variaties in de snelheid van voertuigen, wat tot onveilige situaties kan leiden. Dynamische maximumsnelheden kunnen gebruikt worden om filegolven te voorkomen of het effect ervan te verminderen. Het is noodzakelijk om deze dynamische maximumsnelheden te coördineren om het ontstaan van nieuwe filegolven te voorkomen en omdat het geen negatieve invloed mag hebben op de doorstroming op andere locaties. Om filegolven op te lossen worden bovenstrooms van de verstoring snelheidslimieten ingesteld. Hiermee wordt de instroom in het congestiegebied beperkt. Als de instroom voldoende beperkt wordt, tot een waarde lager dan de uitstroom, dan kan de filegolf opgelost worden.

De benadering die hier gebruikt wordt is 'Model Predictive Control' (MPC). Hierbij worden eerst de snelheidslimieten bepaald zodat de totale reistijd geminimaliseerd wordt. Tegelijkertijd wordt er een veiligheidsrestrictie toegevoegd, waarin staat dat weggebruikers niet geconfronteerd mogen worden met grote verschillen in de maximumsnelheid. Ook mogen de snelheden alleen discrete waarden aannemen.

.....
 Figuur 1 - 3: Schematische weergave
 structuur Model Predictive Control
 (Hegyi, 2005)



De MPC procedure bestaat uit het voorspellen van de netwerkevolutie als een functie van een huidige toestand en de input. Voor de voorspelling wordt er gebruik gemaakt van een uitgebreide versie van het macroscopische verkeersmodel METANET. Deze uitbreidingen houden in dat filegolven beter gemodelleerd kunnen worden en de effecten van snelheidslimieten meegenomen worden.

De methode wordt toegelicht met een standaard probleem. Het netwerk bestaat uit een link van 12 km opgedeeld in segmenten van elk een km. Zes segmenten zijn uitgerust met dynamische snelheidslimieten. De gewenste snelheid wordt gebaseerd op de verkeersomstandigheden en de weergegeven snelheden op de matrixborden. Door simulaties uit te voeren worden de situaties met en zonder snelheidslimieten met elkaar vergeleken. Dynamische maximumsnelheden laten hierbij een verbetering van 20,1% van de reistijd zien. Door het voorspellen heeft het model veel rekentijd nodig, wat het lastig maakt om het in de praktijk toe te passen.

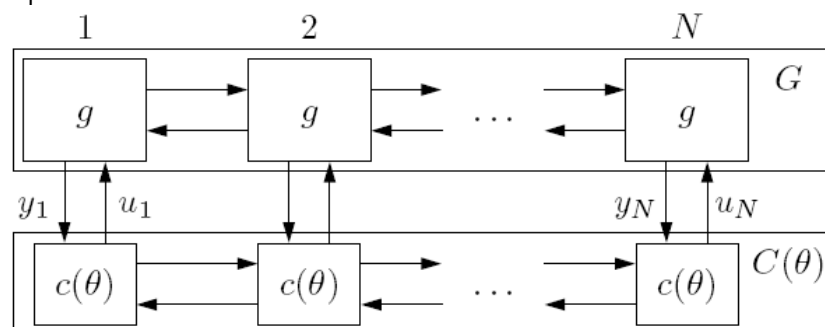
Doordat er voor het verkeersstroommodel, het voorspellingsmodel en verkeersregelsysteem hetzelfde model is gebruikt, is de verbetering van de totale reistijd waarschijnlijk positief beïnvloed. De simulaties hebben wel een indicatie gegeven dat door middel van dynamische snelheidslimieten filegolven kunnen worden opgelost en dat de doorstroming en de reistijd verbeterd kan worden.

Vanwege het soort algoritme en de verwachte impact op de doorstroming is deze benadering geschikt voor een bredere toepassing. Er wordt in het model echter geen rekening gehouden met op- en afritten en tevens is de rekencomplexiteit een aandachtspunt bij grotere netwerken.

Distributed Controller Design voor dynamische maximumsnelheden tegen filegolven op snelwegen

Popov et al. (2008) gebruikten een decentrale feedback regelaar met een vaste structuur voor het oplossen van filegolven. Voor het ontwerp wordt gebruik gemaakt van een directe optimalisatietechniek die geschikt is om te gaan met ontwerpdoelen en het niet-lineaire karakter van het systeem. Het voordeel van een dergelijke regelaar is dat er geen ingewikkelde online berekeningen nodig zijn en alleen lokale informatie gebruikt wordt, waardoor het aantrekkelijker is om het toe te passen.

.....
 Figuur I - 4: Schematische weergave Distributed Controller (Popov, 2008)



Het systeem G bestaat uit N identieke subsystemen g . Het ontwerpprobleem is om een lineair verdeelde regelaar $C(\theta)$ te vinden die bestaat uit N identieke subregelaars $c(\theta)$, zodat de prestatie-index J

geoptimaliseerd wordt. Omdat het een niet-lineair systeem betreft wordt het closed-loop systeem gesimuleerd voor elke $c(\theta)$. Het systeem wordt geoptimaliseerd met een evolutionair algoritme. Dit is een parallelle, stochastische optimalisatiemethode. Het parallelle karakter komt van het feit dat het algoritme bij elke iteratie werkt met een set mogelijke oplossingen. Door de combinatie met een evolutionair algoritme wordt een lokaal optimum vermeden.

Het simulatiemodel dat gebruikt wordt is een uitgebreide versie van het macroscopische verkeersmodel METANET. Er wordt een vereenvoudigd netwerk gebruikt zonder op- en afritten of knooppunten. Dit is een goede aanname voor een weggedeelte tussen twee aansluitingen of voor een weggedeelte met weinig in- en uitvoegend verkeer. Als dit niet het geval is zijn aanvullende maatregelen zoals toeritdosering noodzakelijk. Het model bestaat uit 20 segmenten met elk een lengte van 0,5 km en twee rijstroken. Tien segmenten zijn uitgerust met dynamische maximumsnelheden. Op een zeker moment wordt er benedenstrooms een filegolf gecreëerd. De prestatie-indicator totale reistijd wordt voor de vrije doorstroming, ongeregelde en geregelde situatie gemeten. In de geregelde situatie wordt geprobeerd de totale reistijd te minimaliseren en grote veranderingen in de snelheidslimieten te voorkomen. De regelaar maakt gebruik van informatie van vijf benedenstroomse segmenten en één bovenstrooms segment. Doordat er meer informatie beschikbaar is van de toestand benedenstrooms van de regelaar kan er snel ingespeeld worden op een naderende filegolf. Uit de simulaties kan geconcludeerd worden dat een simpele statische regelaar resultaten en een gecentraliseerde regelaar vergelijkbare resultaten behalen. Het model lost succesvol filegolven op en zorgt voor een vermindering van de totale reistijd van 20%, vergeleken met het ongeregelde systeem.

In vergelijking tot het gebruik van een voorspellende benadering zoals MPC is deze methode aantrekkelijker om in de praktijk toe te passen, omdat er alleen gebruik gemaakt wordt van lokale informatie. Hierdoor blijven de berekeningen simpel. Ook hier worden geen op- en afritten meegenomen, maar een combinatie met bijvoorbeeld toeritdosering is mogelijk.

Dosering op de hoofdrijbaan met dynamische snelheidslimieten

Carlson (2009) stelt een dosering op de hoofdrijbaan voor als een nieuwe en efficiënte methode om de verkeerscondities te verbeteren. Er zijn verschillende mogelijkheden voor de inpassing, zoals dynamische snelheidslimieten met of zonder integratie van toeritdosering. Het huidige bereik van 60 tot 120 km/u moet dan echter wel uitgebreid worden tot 40 km/u om goede resultaten te kunnen behalen. De uitstroom van het geregelde gebied is daardoor lager dan de kritische snelheid. Om de capaciteit van de bottleneck te kunnen behalen, moeten voertuigen de gelegenheid hebben om naar de kritische snelheid te accelereren. Er moet daarom een afstand van ongeveer 700 meter aanwezig zijn tot de bottleneck om van lage snelheden naar ongeveer 70 km/u te accelereren. Voor de simulaties wordt het tweede orde verkeersmodel verwerkt in METANET en uitgebreid met regels voor dynamische snelheidslimieten. Elk traject in het wegennetwerk heeft uniforme eigenschappen. De knopen zijn geplaatst op locaties

waar de wegingdeling verandert, zoals bij op- en afritten. Het oplossingsalgoritme maakt gebruik van een uitgebreide versie van de AMOC (Advanced Motorway Optimal Control), waarin verschillende maatregelen zoals gecoördineerde toeritdosering en variabele snelheidslimieten meegenomen kunnen worden. Het doel is om de totale reistijd te minimaliseren, waarbij de wachtrij op de toerit niet groter mag zijn dan een bepaalde waarde en er geen grote schommelingen in de getoonde snelheidslimieten mogen optreden. De methode wordt toegepast op de ring A10 rond Amsterdam in de richting tegen wijzers van de klok in. Deze ring heeft een lengte van 32 km en heeft 21 opritten en 20 afritten, inclusief de verbindingen met de A8, A4, A2 en A1. In de ongeregelde situatie ontstaat er heftige congestie en ontstaan er lange wachtrijen op de toeritten naar de A10. Er worden verschillende scenario's bekeken zoals, met of zonder toeritdosering, verschillende waarden voor de maximale wachtrij op de toeritten en met of zonder dynamische snelheidslimieten. Men laat zien dat de doorstroming aanzienlijk verbeterd kan worden door middel van dosering op de hoofdrijbaan, met of zonder integratie van toeritdosering.

Door verschillende onzekerheden is de oplossing in de werkelijkheid minder optimaal. De optimale resultaten kunnen echter gebruikt worden in een verplaatsende horizon of voor het trekken van conclusies over de ontwikkeling van efficiënte feedback controle strategieën. Ook hier wordt er gebruik gemaakt van het algoritme AMOC, waardoor het lastig in de praktijk toe te passen is. Verder is de modellering van het fundamenteel diagram onrealistisch, aangezien de capaciteit toeneemt bij het gebruik van snelheidslimieten.

Dynamische snelheidslimieten tijdens wegwerkzaamheden

De huidige strategieën voor snelheidslimieten tijdens wegwerkzaamheden zijn voornamelijk gericht op verkeersveiligheid. Lin (2004) bespreekt twee algoritmen voor dynamische snelheidslimieten, waarbij ingegaan wordt op het verbeteren van de doorstroming en het minimaliseren van de wachtrij. Het algoritme dat de wachtrij minimaliseert bestaat uit twee modules. De eerste module berekent de initiële snelheid van elk paneel. Hierbij wordt de intensiteit van het eerste segment gelijk gesteld aan de intensiteit ter hoogte van de afsluiting van rijstroken. In de tweede module worden de getoonde snelheidslimieten bijgesteld aan de hand van een schatting van het verschil tussen de gedetecteerde doorstroomsnelheid en de gewenste snelheid.

Voor de evaluatie van het algoritme is gebruik gemaakt van simulatiemodel dat gekalibreerd is met velddata. Er zijn verschillende scenario's opgesteld: snelweg van twee en drie rijstroken waarvan één rijstrook is afgesloten en een snelweg met drie rijstroken waarvan twee rijstroken zijn afgesloten. De simulaties laten zien dat er met variabele snelheidslimieten een verbetering is te behalen in doorstroming en een vermindering van de vertraging. Hoewel de gemiddelde snelheden ongeveer gelijk blijven aan de snelheden in de ongeregelde situatie, worden de verschillen tussen de snelheden kleiner. Dit kan indirect zorgen voor een verbetering van de verkeersveiligheid tijdens wegwerkzaamheden.

Omdat deze benadering alleen gebruikt kan worden tijdens werkzaamheden is hij beperkt toepasbaar. Bij de naleving van snelheden wordt van een lineaire relatie tussen de snelheid en de opvolging uitgegaan, wat niet realistisch is.

Dynamax – A12 Voorburg

Ook op de A12 Voorburg (Den Haag – stad uit) wordt sinds december 2009 geëxperimenteerd met dynamische maximumsnelheden om de doorstroming te verbeteren. Hierbij moet een verhoging van de snelheidslimiet van 80 naar 100 km/u het complexe rijstrookwisselgedrag faciliteren. Ook in de nachtelijke uren wordt de snelheid verhoogd van 80 naar 100 km/u. De aangepaste limieten worden met een rode rand weergegeven en er is sprake van dynamische trajectcontrole voor 80 en 100 km/u.

Het betreft het weefvak tussen de toerit Voorburg en het Prins Clausplein in de richting Utrecht. Bij de toerit bestaat de hoofdrijbaan van de A12 uit drie rijstroken. De toerit komt hier als vierde rijstrook bij. Aan het einde van het weefvak splitsen de vier rijstroken zich in twee rijstroken richting Utrecht en twee stroken richting Amsterdam/Rotterdam (A4). Meestal ontstaat hier file in de avondspits. De intensiteit op de afrit naar de A4 is bepalend voor het wel of niet ontstaan van file.

Het algoritme op de A12 Voorburg werkt met afgevlakte waarden voor de intensiteit en snelheid. Als de snelheid of intensiteit boven een bepaalde drempelwaarde uitkomt, wordt de aangepaste snelheid ingesteld. Hierbij is er een vertragingstijd van drie minuten ingebouwd om snel opeenvolgend in- en uitschakelen te voorkomen.

De resultaten van de proef duiden op een verbeterde doorstroming als gevolg van de snelheidsverhoging.

Op het proeftraject is een verhoging van de gemiddelde snelheid gemeten, ten opzichte van een maximumsnelheid van 80 km/u. Deze toename bedraagt circa 10 km/u. Ook vrachtwagens verhogen hun snelheid licht. De verklaring hiervoor kan gevonden worden in de angst voor de trajectcontrole bij een maximumsnelheid van 80 km/u. De snelheidsverhoging is 's nachts groter dan aan de randen van de spits. De verklaring hiervoor is dat de dichtheid van het verkeer aan de randen dusdanig groot is dat er slechts een kleine toename van de snelheid mogelijk is. De congestie is na de invoering van de maatregel (bij vergelijkbare intensiteiten) afgenomen. Zowel de reistijd, het aantal voertuigverliesuren als de filezwaarte neemt af. De resultaten duiden erop dat de capaciteit aan de randen van de spits daadwerkelijk is toegenomen (ca. 9%). De toegenomen capaciteit kan verklaard worden doordat de verhoging van de maximumsnelheden meer dynamiek in het verkeer brengt. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de gemeten toename van het verkeer op de linkerstrook (ca. 4%) en de grotere variatie in gereden snelheden. Door de grotere dynamiek van het verkeer wordt een hogere capaciteit bereikt.

Adaptieve toeritdosering en variabele snelheidslimieten: een genetisch-fuzzy benadering

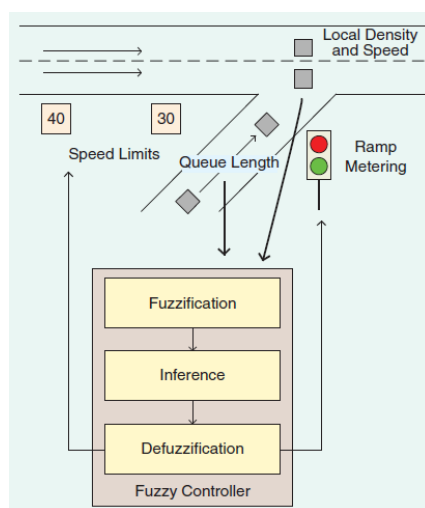
Ghods (2009) combineert dynamische maximumsnelheden met toeritdosering om zo congestie te verminderen. Toeritdosering wordt gebruikt op de toerit naar een snelweg, waarbij er steeds maar één auto wordt doorgelaten. Hiermee wordt het ontstaan van congestie uitgesteld. Het nadeel is echter dat de capaciteit van de toerit beperkt is. Dynamische snelheidslimieten kunnen dit gedeeltelijk opvangen door de effectiviteit van de toeritdosering te vergroten. Bovenstrooms van de oprit kunnen dynamische snelheidslimieten zorgen voor een verminderde uitstroom, zodat er ruimte ontstaat voor het invoegende verkeer. Hierdoor blijft de dichtheid in het gebied van de invoegstrook laag en kunnen verstoringen voorkomen worden.

De voorgestelde methode zorgt voor een verbeterde prestatie van het wegennetwerk, terwijl de berekeningen simpel blijven.

De input van het systeem is de lokale dichtheid, de lokale snelheden op de hoofdrijbaan ter hoogte van de invoegstrook en de lengte van de file op de toerit. Als output van de fuzzy regeling worden de doseerhoeveelheid en de twee snelheidslimieten bovenstrooms van de oprit gegeven.

In Figuur II - 1 is een schematische weergave van het systeem te zien. In de eerste stap worden de in- en outputwaarden veranderd in de waarden 'laag', 'medium' en 'hoog'. In de kern van het fuzzy systeem worden de feiten uit het 'fuzzification' proces gecombineerd met een fuzzy beredenering. De regels zijn gebaseerd op kennis en ervaring. Na dit proces moet de output variabelen omgezet worden in een getal. Hiervoor wordt de 'center of gravity' methode gebruikt.

Figuur II - 1: Schematische weergave fuzzy controller (Ghods, 2009)



Voor de modellering wordt er gebruik gemaakt van een uitgebreide versie van het macroscopische verkeersmodel METANET. Er wordt van een genetisch algoritme gebruik gemaakt om de fuzzy parameters in te stellen en te voorspellen hoe het systeem in een voorspellingshorizon van vijf minuten presteert.

In een case study wordt de combinatie van snelheidslimieten en toeritdosering vergeleken met de ongeregelde situatie, ALINEA

en de genetisch-fuzzy methode met alleen toeritdosering. De scenario's worden met elkaar vergeleken op basis van de TTS. Er wordt gebruik gemaakt van een traject van zes km dat bestaat uit zes segmenten van elk één km. Het netwerk heeft twee herkomsten, waarvan één de

hoofdrijbaan is en de ander een toerit. Het traject heeft twee rijstroken met een capaciteit van 4000 vtg/u. De oprit uitgerust met toeritdosering heeft een capaciteit van 2000 vtg/u. De twee segmenten bovenstrooms van de oprit zijn uitgerust met dynamische snelheidslimieten. Om terugslag naar het onderliggend wegennet te voorkomen mogen er maximaal 150 voertuigen voor de toeritdosering staan. Verder wordt aangenomen dat de bestuurders de maximumsnelheden volledig opvolgen.

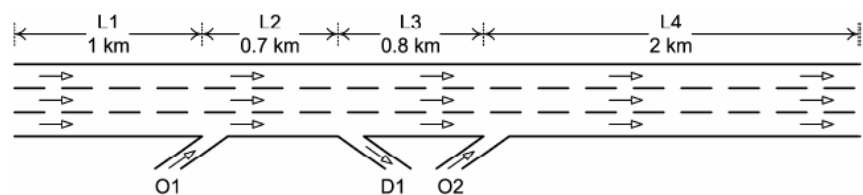
In de ongeregelde situatie is de totale reistijd 1445,7 vtg.u. Met het ALINEA algoritme vindt er een verbetering van 4,8% plaats. Met het fuzzy-genetisch algoritme is de verbetering 5% en door de combinatie met snelheidslimieten wordt de totale reistijd met 15,5% verminderd. In vergelijking tot het ALINEA algoritme zorgt de fuzzy regelaar voor minder schommelingen in de toestand van het verkeer.

Het algoritme dat bij deze benadering gebruikt wordt lijkt een geschikte methode om congestie bij opritten op te lossen. De benadering maakt echter gebruik van fuzzy regels, waarvoor kennis en ervaring nodig is wat het lastiger maakt om het in de praktijk toe te passen. Verder is de aanwezigheid van een toeritdoseringsinstallatie noodzakelijk om een optimale prestatie te behalen. Bij de simulaties is men er vanuit gegaan dat de snelheden volledig opgevolgd worden, wat onrealistisch is.

Geïntegreerde toeritdosering met variabele snelheidslimieten

Papamichail (2008) keek naar de impact van dynamische maximumsnelheden gecombineerd met toeritdosering op de verkeersstroom. De dynamische maximumsnelheden zijn als een extra regeling verwerkt in een tweede orde verkeersmodel. Het geïntegreerde netwerk verkeersregeling probleem is geformuleerd als een discreet tijd optimaal controle probleem. Daarna wordt het probleem zelfs voor grote netwerken efficiënt opgelost door een bruikbaar 'direction algorithm'. Voor de simulaties wordt het tweede orde verkeersmodel verwerkt in METANET en uitgebreid met regels voor variabele snelheidslimieten. Elk traject in het wegennetwerk heeft uniforme eigenschappen. De knopen zijn geplaatst op locaties waar de wegindeling verandert, zoals bij toe- en afritten. Het netwerk zoals dat in deze studie is gebruikt is weergegeven in Figuur II - 2.

Figuur II - 2: Het traject met drie rijstroken en twee toeritten (Papamichail, 2008)



Het oplossingsalgoritme maakt gebruik van AMOC (Advanced Motorway Optimal Control), waarbij de optimale doseringsgraad en de waarden van dynamische snelheidslimieten worden bepaald, zodat de totale reistijd geminimaliseerd wordt.

In de ongeregelde situatie is de totale reistijd gelijk aan 1204 vtg.u. Bij de toepassing van AMOC voor gecoördineerde toeritdosering treedt er een verbetering van de totale reistijd op van 2,7% vergeleken met de ongeregelde situatie. Door de toepassing van variabele snelheidslimieten verbetert de totale reistijd met 38,5% ten opzichte

van de ongeregelde situatie. De snelheidslimieten zijn zo ingesteld dat er in het invoeggebied de hoogste capaciteit en intensiteit behaald wordt. Als variabele snelheidslimieten gecombineerd worden met toeritdosering dan verbetert de totale reistijd zelfs met 44,1%. Door verschillende onzekerheden is de oplossing in de werkelijkheid minder optimaal. De optimale resultaten kunnen echter gebruikt worden in een verplaatsende horizon of voor het trekken van conclusies over de ontwikkeling van efficiënte feedback controle strategieën. De eigenschappen van de locatie worden duidelijk weergegeven in dit artikel en er wordt ook een aanzienlijke doorstromingsverbetering voorspeld. Voor het algoritme wordt echter gebruik gemaakt van een onrealistisch fundamenteel diagram waarbij de capaciteit toeneemt bij het gebruik van dynamische snelheidslimieten. Het oplossingsalgoritme AMOC is vergelijkbaar met MPC, waardoor er rekening gehouden moet worden met de rekencomplexiteit bij de toepassing in de praktijk.

Model Predictive Control (MPC) voor een optimale coördinatie van toeritdosering en variabele snelheidslimieten

Hegy (2005) bespreekt een methode voor de optimale coördinatie van dynamische maximumsnelheden en toeritdosering in een netwerk. Het doel hierbij is de totale reistijd van voertuigen in een netwerk te minimaliseren door gebruik te maken van MPC en een uitgebreide versie van het macroscopische verkeersmodel METANET als voorspellingsmodel. Dit resulteert in een voorspellende gecoördineerde benadering waarin dynamische maximumsnelheden het afremmen van het verkeer moeten voorkomen en de doorstroming behouden blijft, zelfs als de toeritdosering niet in staat is om congestie te voorkomen. Voor de simulatie wordt gebruik gemaakt van een netwerk met twee herkomsten (hoofddrijbaan en toerit), twee links en één bestemming. Elke link heeft twee rijstroken met elk een capaciteit van 2000 voertuigen per uur. De eerste link is vier km en bestaat uit vier segmenten van één km, waarvan twee segmenten bovenstrooms van de toerit uitgerust zijn met dynamische snelheidslimieten. De tweede link bestaat uit twee segmenten met elk een lengte van één km. De lengte van de wachtrij op de toerit mag niet langer zijn dan 100 voertuigen. De scenario's ongeregeld, toeritdosering, gecoördineerde toeritdosering en dynamische snelheidslimieten worden met elkaar vergeleken op basis van de totale reistijd.

In de ongeregelde situatie is de totale reistijd 1460 vtg.uur.

Toeritdosering levert een verbetering van 5,4% en gecoördineerde toeritdosering en variabele snelheidslimieten vermindert de totale reistijd met 14,3%. Ook worden variabele snelheidslimieten vergeleken met dosering op de hoofddrijbaan door middel van doseerlichten. Dit levert vergelijkbare resultaten op (15% afname). Doseerlichten zijn echter lastiger toe te passen in de praktijk. Afhankelijk van de intensiteiten moet er gekozen worden voor variabele snelheidslimieten of dosering van de hoofdstroom.

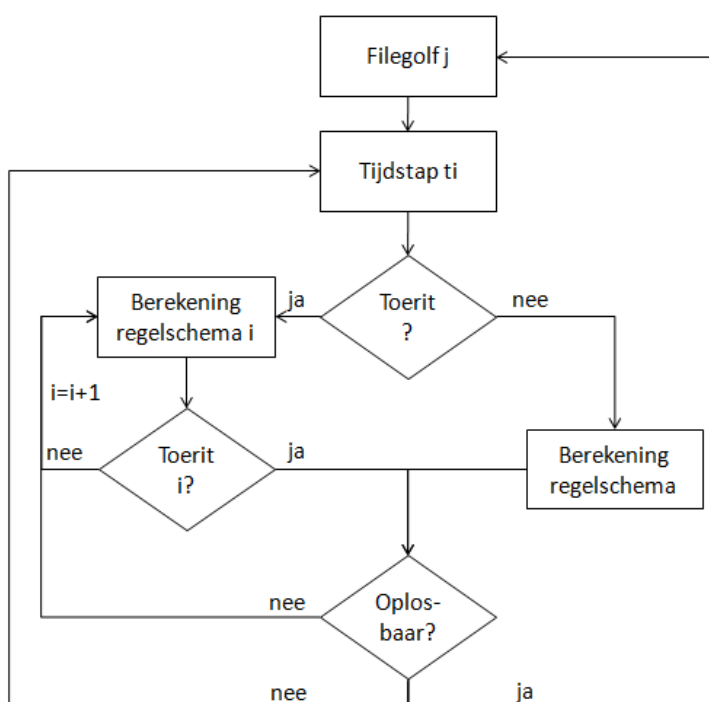
De score van deze benadering is vergelijkbaar met de benadering waarbij optimale coördinatie van variabele snelheidlimieten wordt gebruikt om filegolven op te lossen. Het verschil is dat er bij deze benaderingen gebruik gemaakt wordt van toeritdosering, waardoor de prestatie van het algoritme toe kan nemen.

Bijlage III: Uitwerking regelschema met toeritdosering

In deze bijlage wordt de constructie van het regelschema, dat besproken is in hoofdstuk 3, toegelicht. In deze regeling worden dynamische maximumsnelheden gecombineerd met toeritdosering.

In Figuur III - 1 is het stappenschema weergegeven dat per tijdstap wordt uitgevoerd om te bepalen welk regelschema geconstrueerd moet worden. De invoer zijn de eigenschappen in en rondom de filegolf per tijdstap zoals locatie, intensiteiten, snelheden en dichtheden. Het stroomschema is geïmplementeerd in Matlab.

Figuur III - 1: Stroomschema voor het bepalen van de toeritlocatie en de oplosbaarheid



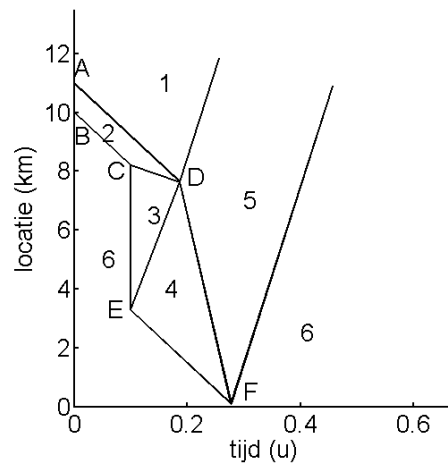
Eerst wordt er gecontroleerd of er een toerit aanwezig is in het gedeelte stroomopwaarts van de filegolf dat in vrije afwikkeling is. Vervolgens worden de toestanden 1-6 bepaald. De frontsnelheden tussen de verschillende toestanden kunnen afgeleid worden van het fundamenteel diagram op basis van schokgolftheorie (zie paragraaf 2.2).

Bij aanwezigheid van een toerit wordt dit regelschema voor vier (i) mogelijke locaties van toeritten doorgerekend. Er wordt gecontroleerd of de locatie van de toerit voldoet aan het berekende scenario en of dit tot een oplosbare situatie leidt. Er is maximaal één scenario oplosbaar. Als de filegolf op tijdstap t_i niet oplosbaar is, gaat men naar de volgende tijdstap totdat de filegolf als oplosbaar wordt beschouwd of de filegolf uit zichzelf opgelost is. Daarna kan van de volgende filegolf de oplosbaarheid worden bepaald.

Per mogelijke toeritlocatie zal beschreven worden hoe de snijpunten van het regelschema berekend worden en hoe gecontroleerd wordt of dit tot een oplosbare situatie leidt.

a. Geen toerit

Figuur III - 2: Naamgeving van de snijpunten van de verschillende toestanden



Als er stroomopwaarts van de filegolf geen toerit aanwezig is, is het regelschema van toepassing dat in Figuur III - 2 is weergegeven. De snijpunten van de verschillende toestanden worden als volgt berekend:

1. Punt A de locatie van de kop van de filegolf op het moment dat deze is gedetecteerd;
2. Punt B is de locatie van de staart van de filegolf op het moment dat deze is gedetecteerd;
3. Punt C is de locatie van de staart van de filegolf op het moment dat de filegolf als oplosbaar wordt beschouwd;
4. Punt D is het snijpunt van het front tussen de toestanden 2 en 3 met het front tussen toestand 1 en 2. Dit front heeft over het algemeen een snelheid van -18 km/u ;
5. Als de snelheidslimieten over een voldoende lang traject worden ingezet vanaf punt E, tot het snijpunt met de lijn CD, dan snijdt het front tussen toestand 3 en 4 punt D.
6. Punt F volgt uit het snijpunt van het front tussen toestand 4 en 5 vanuit punt D met het front tussen toestand 4 en 6 vanuit punt E.

Om onrealistische regelschema's te voorkomen zijn er eisen gesteld ten aanzien van de snijpunten van de verschillende toestanden.

- Punt D moet altijd later zijn dan punt C;
- Punt C moet onder de lijn AD liggen;
- Punt E moet stroomopwaarts van punt C liggen;
- Punt F moet later zijn dan punt E (was D);
- Het hele schema moet stroomafwaarts van het beginpunt liggen en het gebied moet in vrije afwikkeling zijn.

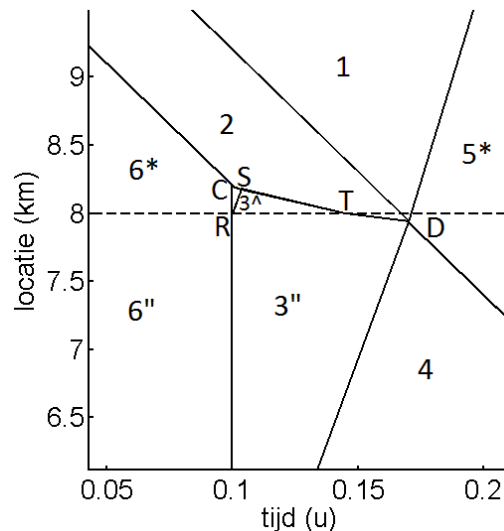
Als de filegolf in de eerste tijdstap als oplosbaar wordt beschouwd en er geen meetvertraging is, dan zal punt C gelijk zijn aan punt B.

Indien er een toerit aanwezig is wordt deze aangeduid met de letter R. De t-coördinaat is gelijk aan het moment van inschakelen van de dynamische maximumsnelheden.

b. Toeritlocatie 1

In Figuur III - 3 is ingezoomd op het gedeelte van het regelschema dat verandert bij een toerit op locatie 1. De extra snijpunten die hierbij bepaald moeten worden zijn punt R, S en T.

Figuur III - 3: Naamgeving van de snijpunten van de verschillende toestanden bij toeritlocatie 1



1. Punt A, B en C worden op dezelfde manier bepaald als bij de situatie zonder toerit;
2. De lijn tussen R en S heeft dezelfde snelheid als de snelheidslimiet en geeft het moment aan waarop de toerit dosering effect krijgt. Punt S is het snijpunt van het front tussen 2 en 3* vanuit punt C met het front tussen 3* en 3^ vanuit punt R;
3. Punt T is het snijpunt van het front tussen 2 en 3^ met de toerit;
4. Punt D is het snijpunt van front tussen 2 en 3'' vanuit punt D en het front tussen toestand 1 en 2. Als de frontsnelheid tussen toestand 2 en 3'' positief is zal de staart van de file niet voorbij de toerit propageren en wordt een frontsnelheid van 0 km/u aangenomen.
5. De punten E en F liggen stroomopwaarts van de toerit en worden op dezelfde manier berekend als in de situatie zonder toerit. Aangezien de toerit toestand 5 kruist zal er stroomopwaarts van de toerit een lagere intensiteit gelden. Dit wordt gerealiseerd door de snelheid waarmee de snelheidslimieten opgeheven worden (het front tussen 4 en 5'');

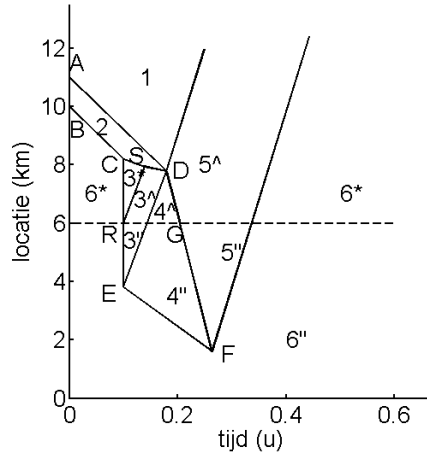
Om te controleren of dit regelschema van toepassing is moet de toerit stroomopwaarts van punt C en stroomafwaarts van punt D liggen. Om te voorkomen dat een situatie ten onrechte als toeritlocatie 1 beoordeeld wordt door onrealistische regelschema's, zijn er extra eisen gesteld ten aanzien van de snijpunten van het regelschema.

- Punt S en T moeten eerder zijn dan Punt D;
- Punt T moet later zijn dan Punt C;

c. Toeritlocatie 2

In Figuur III - 4 is het regelschema weergegeven voor toeritlocatie 2. De extra snijpunten die hierbij bepaald moeten worden ten opzichte van de situatie zonder toerit zijn punt R, S en G.

Figuur III - 4: Naamgeving van de snijpunten van de verschillende toestanden bij toeritlocatie 2



1. Punt A, B, C en S worden op dezelfde manier bepaald als bij toeritlocatie 1;
2. Punt D is het snijpunt van het front tussen 2 en 3[^] vanuit punt S met het front tussen toestand 1 en 2;
3. Punt E wordt op dezelfde manier bepaald als bij toeritlocatie 1;
4. Punt F is afhankelijk van de locatie van de toerit en de snelheid van het front tussen toestand 4'' en 6''.

Bij een stroomopwaarts propagerend front wordt eerst het snijpunt van het front tussen 4[^] en 5[^] vanaf punt D met de toerit bepaald. Dit is punt G. Punt F volgt dan uit het snijpunt van het front tussen 4'' en 5'' vanuit G en het front tussen 4'' en 6'' vanaf punt E.

Bij een stroomafwaarts propagerend front moet eerst gecontroleerd worden welk front (4''-6'' of 4[^]-5[^]) als eerste de toerit bereikt. Dit is punt G. Als het front tussen 4[^] en 5[^] als eerste de toerit bereikt volgt punt F uit het snijpunt van het front tussen 4'' en 5'' met het front tussen 4'' en 6'' vanaf punt E.

Als het front tussen 4'' en 6'' als eerste de toerit bereikt volgt punt F uit het snijpunt van het front tussen 4[^] en 6[^] met het front tussen 4[^] en 5[^] vanaf punt D.

Dit regelschema is alleen van toepassing als de toerit tussen punt D en punt E in het regelschema ligt.

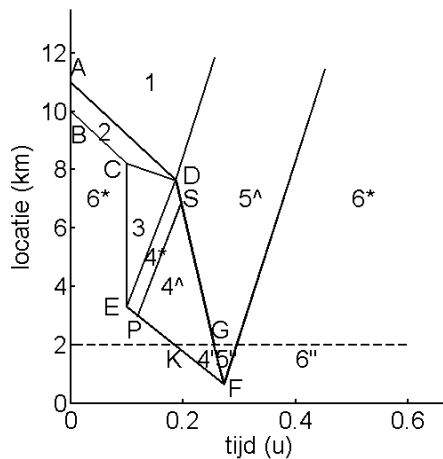
Een extra eis die gesteld kan worden om onrealistische regelschema's te voorkomen is dat punt S altijd eerder moet zijn dan punt D. Ook moet punt F stroomopwaarts van punt D liggen.

d. Toeritlocatie 3

In Figuur III - 5 is het regelschema weergegeven als het regelschema de toerit snijdt bij locatie 3. Toeritdosering kan hier bijdragen aan een kleiner gebied met snelheidslimieten. Ook kan toeritdosering

voorkomen dat er nieuwe filegolven ontstaan door de verhoogde uitstroom na het oplossen van de filegolf.

.....
 Figuur III - 5: Naamgeving van de snijpunten van de verschillende toestanden bij toeritlocatie 3



1. De punten A, B, C, D en E worden op dezelfde manier bepaald als bij de situatie zonder een toerit;
2. De toeritdosering heeft pas effect als de verlaagde intensiteit vanaf de toerit over het hele gebied stroomopwaarts van de snelheidslimieten van toepassing is. Dit is snijpunt van de lijn R-P met het front tussen 4* en 6*; De lijn tussen R en P heeft dezelfde snelheid heeft als de snelheid in gebied 6*.
3. De grens tussen het gebied 4 met en zonder toeritdosering is de lijn tussen P en S, met de snelheid gelijk aan de snelheidslimiet. Punt S is het snijpunt van de lijn tussen P en S met het front tussen 4* en 5* vanaf punt D;
4. Punt G is het snijpunt van het front tussen 4^ en 5^ met de toerit vanaf punt S;
5. Punt K is het snijpunt van het front tussen 4^ en 6^ met de toerit vanaf punt P;
6. Punt F is het snijpunt van het front tussen 4'' en 6'' vanaf punt P met het front tussen 4'' en 5'' vanaf punt G.

Dit regelschema is alleen van toepassing als de toerit stroomopwaarts van punt E ligt en stroomafwaarts van punt F. Verder moeten punt P en K eerder zijn dan punt F.

e. Toeritlocatie 4

Op deze locatie ligt het regelschema volledig stroomafwaarts van de toerit. Toeritdosering kan in bepaalde situaties nog bijdragen aan de grootte van gebied 4. Dit is alleen mogelijk als punt P eerder het front tussen 4* en 6* snijdt dan het front tussen 4* en 5*. (punt P moet eerder zijn dan punt F)

1. De punten A-F berekend op dezelfde manier als bij toeritlocatie 1;
2. Als uit de locatie van punt P blijkt dat toeritdosering nog effect kan hebben op gebied 4, wordt punt S berekend op dezelfde manier als bij toeritlocatie 3;
3. Punt F volgt uit het snijpunt van het front tussen 4^ en 5^ vanaf punt S met het front tussen 4^ en 6^ vanaf punt P.

Extra eisen die gesteld worden voor de oplosbaarheid zijn dat de toerit stroomopwaarts van de punten E en F moet liggen.

Bijlage IV: Globale selectie van trajecten met filegolven

	van km	tot km	lengte		van km	tot km	lengte
A1Re	4.023	39.511	35.488	A1Li	36.302	11.08	25.222
	48.405	80.076	31.671		98.991	38.556	60.435
	89.66	98.991	9.331		141.689	104	37.689
	104	140.829	36.829				
A2Re	33.615	63.108	29.493	A2Li	88.749	30.6	58.149
	64.315	95.594	31.279		140.39	100.1	40.29
	100.1	119.797	19.697		187.942	172.936	15.006
	120.965	144.084	23.119		218.245	200.06	18.185
	170.264	193.532	23.268		239.312	219.432	19.88
	200.092	220.413	20.321				
	221.674	230.842	9.168				
	232.075	246.233	14.158				
A4Re	0	18.216	18.216	A4Li	35.246	0.07	35.176
	23.901	52.647	28.746		53.464	36.799	16.665
A6Re	58.044	75.862	17.818	A6Li	75.414	41.665	33.749
A7Re	5.414	33.7	28.286	A7Li	33.667	14.512	19.155
	165.206	175.261	10.055		161.21	136.391	24.819
	181.273	192.761	11.488		192.779	181.252	11.527
A9Re	21.345	36.519	15.174	A9Li	49.332	21.252	28.08
	38.235	49.574	11.339				
	51.819	69.253	17.434				
A10Re	1	15.869	14.869	A10Li	33.067	9.48	23.587
	17.278	30.653	13.375				
A12Re	3.228	16.566	13.338	A12Li	3.252	13.47	10.218
	26.904	70.448	43.544		15.403	92.017	76.614
	71.797	92.2	20.403		102.2	137.513	35.313
	102.2	147.808	45.608				
A13Re	3	19.765	16.765	A13Li	19.714	5.373	14.341
A15Re	51.62	66.414	14.794	A15Li	63.037	38.036	25.001
	72.65	94.769	22.119		94.595	69.998	24.597
	105.325	141.004	35.679		114.201	96.823	17.378
					140.333	115.241	25.092
				162.638	141.452	21.186	
A16Re	14.125	25.75	11.625	A16Li	35.836	15.57	20.266
	28.096	59.332	31.236		53.039	38.004	15.035
				A17Li	24.839	15.029	9.81
A20Re	26.039	48.962	22.923	A20Li	48.52	16.83	31.69
A27Re	0.069	44.792	44.723	A27Li	25.297	5.407	19.89
	77	118.847	41.847		55.606	27.959	27.647
					92.049	77	15.049
					117.781	94.16	23.621

A28Re	1.699	22.7	21.001	A28Li	22.7	0	22.7
	26.7	63.658	36.958		81.661	26.7	54.961
	65.952	87.45	21.498		113.671	90.46	23.211
	96.6	109.464	12.864				
	120.81	131.919	11.109				
	189.725	200.159	10.434				
A30Re	7.623	24.268	16.645				
A44Re	0.471	17.876	17.405	A44Li	17.922	0.275	17.647
A50Re	131.541	170.24	38.699	A50Li	129.719	113.471	16.248
	183.136	192.159	9.023		159.588	131.447	28.141
	193.861	225.708	31.847		216.399	183.132	33.267
	227.584	239.515	11.931				
A58Re	34.624	63.55	28.926	A58Li	63.402	0	63.402
	72.656	93.81	21.154		93.692	71.212	22.48
A59Re	88.022	113.935	25.913	A59Li	102.866	88.186	14.68
	116.556	135.252	18.696		135.828	116.109	19.719
	139.436	155.87	16.434		156.267	139.698	16.569
A67Re	10.466	19.739	9.273	A67Li	41.48	22.803	18.677
	23.594	41.469	17.875				
	58.789	73.356	14.567				
A73Re	78.847	104.57	25.723	A73Li	89.867	78.805	11.062
					103.632	94.368	9.264
A76Re	2.768	14.552	11.784	A76Li	14.622	2.181	12.441

Bijlage V: Contourplots van trajecten uit globale selectie

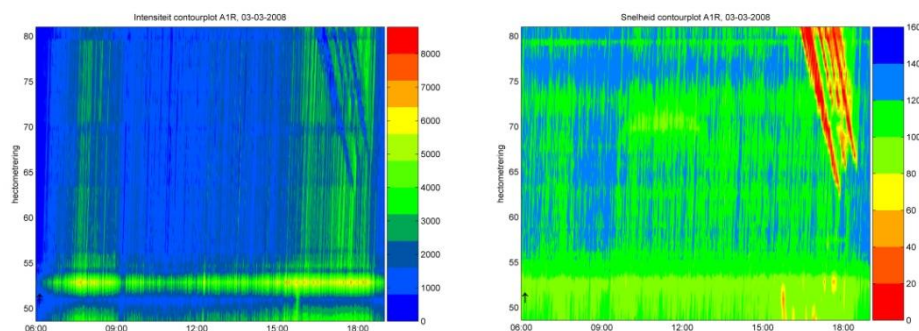
Van een deel van de trajecten die uit de globale selectie kwamen is data verwerkt in Monigraph. Om een representatief beeld te krijgen van de verkeerssituatie op een traject is er gekeken naar de werkdagen van 3 tot 14 maart in 2008 van 6:00 tot 19:00.

Het gaat hierbij om de volgende trajecten:

- A1Re Hoevelaken km 48 – Hoenderloo km 80
- A2Re Holendrecht km 33- Oudenrijn km 63
- A2Re Oudenrijn km 64 – Waardenburg km 95
- A4Re De Nieuwe meer km 0 – Burgerveen km 18
- A4Re Roelofarendsveen km 23 - Den Haag-Zuid km 53
- A9Re Holendrecht km 21 - Badhoevedorp km 36
- A12Re Gouwe km 27 – Bunnik km 70
- A12Li Veenendaal km 92 - Zoetermeer km 15
- A15Re Hendrik Ido Ambacht km 72 – Gorinchem km 95
- A27Re St. Annabosch km 0 – Noordeloos km 45

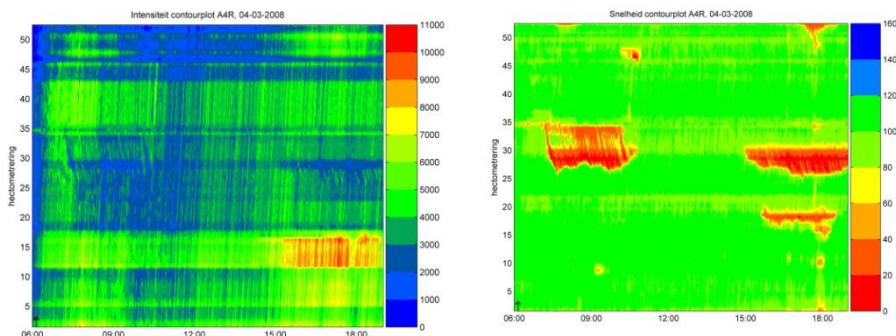
In deze bijlage zullen enkele contourplots van de trajecten weergegeven worden die een representatief beeld geven de verkeerssituatie. De contourplots van de A2 en de A15 zijn al in het hoofdrapport weergegeven.

Figuur V - 1: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van de A1Re Hoevelaken km 48 – Hoenderloo km 80 op 03-03-2008



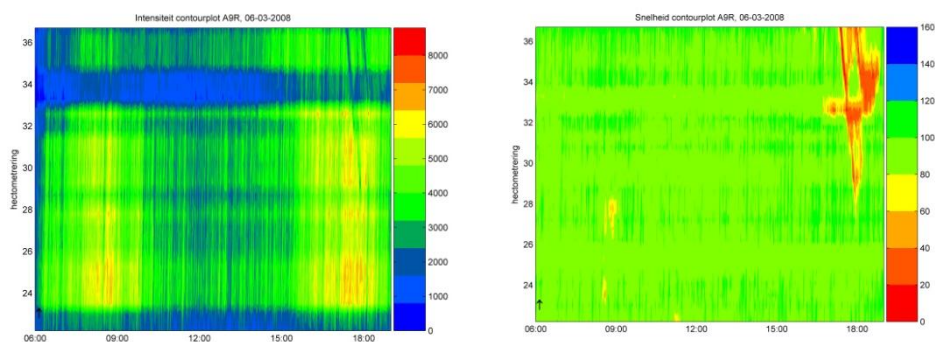
Op de meeste dagen waren geen filegolven aanwezig op het traject op de A1. In Figuur V - 1 zijn de contourplots weergegeven waarbij duidelijk wel filegolven aanwezig zijn. Mogelijk zijn de filegolven uitlopers van een grotere file verder stroomafwaarts. Er zouden meer dagen onderzocht moeten worden om vast te stellen of er regelmatig filegolven optreden.

Figuur V - 2: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van de A4Re De Nieuwe Meer km 0 – Den Haag-Zuid km 53 op 04-03-2008



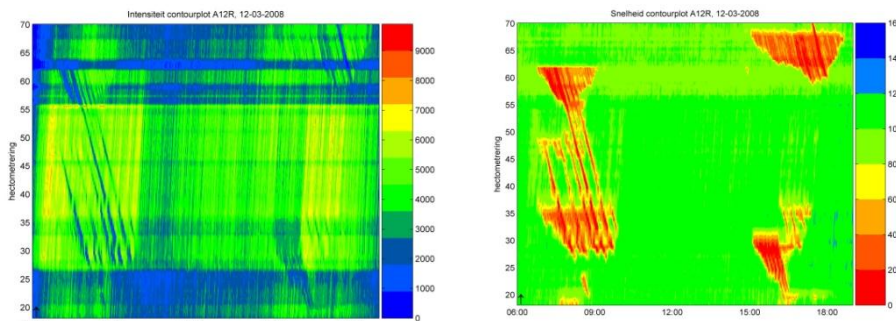
In Figuur V - 2 zijn de contourplots van de A4 weergegeven voor een representatieve dag. Hierbij valt op dat er nauwelijks filegolven optreden, maar dat er vooral staande files optreden rondom de aansluiting met de N11. De hoge verkeersintensiteiten rondom knooppunt Prins Clausplein zouden kunnen verklaren waarom dit traject toch binnen de selectie valt.

Figuur V - 3: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van de A9Re Holendrecht km 21 - Badhoevedorp km 36 op 06-03-2008



Op de A9 is op elke dag waarvoor data verwerkt is file aanwezig. Een deel daarvan zijn filegolven die mogelijk met dynamische maximumsnelheden op te lossen zijn. Op andere dagen is de frequentie van filegolven zo hoog of is er sprake van een bottleneck stroomafwaarts, waardoor de filegolven niet zijn op te lossen met dynamische maximumsnelheden. In Figuur V - 3 is een voorbeeld gegeven van een situatie waarbij de filegolven waarschijnlijk wel met dynamische maximumsnelheden op te lossen zijn.

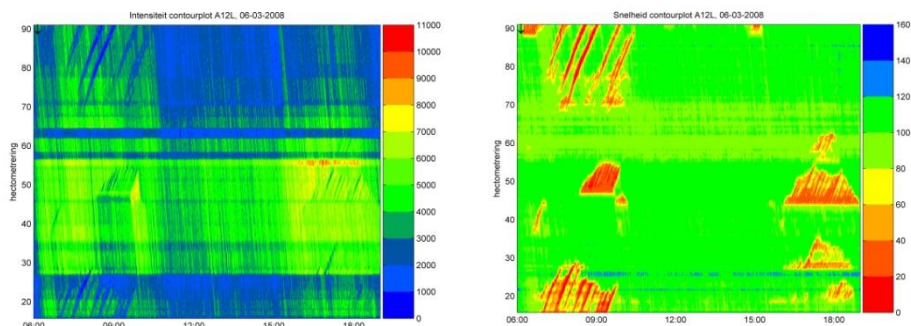
Figuur V - 4: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van de A12Re Gouwe km 27 – Bunnik km 70 op 12-03-2008



Op een deel van het traject dat weergegeven is in Figuur V - 4 is geëxperimenteerd met dynamische maximumsnelheden. Op dit

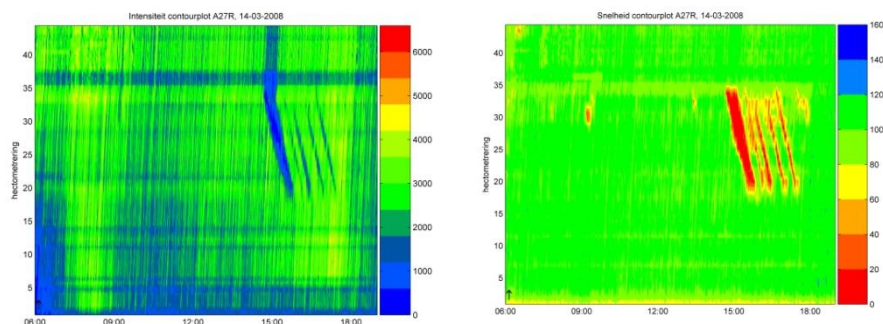
traject treden dan ook met hoge frequentie filegolven op die zich over het gehele traject verplaatsen. De meeste filegolven ontstaan bij de bocht tussen Woerden en Harmelen (km. 48). Verder staan er regelmatig staande files bij de aansluiting met de N11 ter hoogte van km 35.9 bij Bodegraven. Deze files kunnen waarschijnlijk niet worden opgelost met dynamische maximumsnelheden.

.....
 Figuur V - 5: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van de A12Li Veenendaal km 92 - Zoetermeer km 15 op 06-03-2008



Op de A12Li treden ook met hoge frequentie filegolven op. In de ochtendspits ontstaan er filegolven ter hoogte van Driebergen en in de avondspits ontstaan er regelmatig filegolven met een hoge frequentie ter hoogte van Woerden. Verder ontstaan er regelmatig filegolven en staande files ter hoogte van de aansluiting met de A20. In Figuur V - 5 is een voorbeeld weergegeven van een representatieve dag. Bij dit traject is de rijrichting tegenovergesteld aan de andere trajecten.

.....
 Figuur V - 6: Intensiteit contourplot (links) en een snelheid contourplot (rechts) van de A27Re St. Annabosch km 0 - Noordeloos km 45 op 12-03-2008



Op de A27 treden zowel in de ochtend- als avondspits regelmatig filegolven op. Door de hoge frequentie op sommige dagen zullen niet alle filegolven op te lossen zijn. De meeste filegolven ontstaan stroomopwaarts van knooppunt Gorinchem (ca. km 35). Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur V - 6.