

Datafusie van detectielusgegevens en reistijdmetingen

Onder welke omstandigheden kan door slim combineren van verschillende soorten meetdata een betere en goedkopere real-time toestandsschatting worden gegeven?

Benno van der Griendt

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek
Afstudeerrichting Transport & Planning



Voorwoord

Voor u ligt het rapport dat hoort bij de afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de TU Delft met als afstudeerrichting Transport & Planning.

Tijdens de laatste twee studie jaren werd mijn interesse gewekt door vakken over verkeersafwikkeling en –modellering. Tijdens mijn stage is deze interesse bevestigd en heb ik besloten ook mijn afstudeeronderzoek op dit gebied te doen. Op basis van onder andere artikelen in het vakblad Verkeerskunde had ik het idee om het gebruik van GSM gegevens bij het inschatten van de verkeersstoestand op de weg te onderzoeken. Hierover is echter al veel onderzoek verricht. Rijkswaterstaat was geïnteresseerd in het gebruik van reistijdmetingen in plaats van GSM gegevens. Aangezien reistijdmetingen een aantal lastige eigenschappen hebben en daardoor nog niet gebruikt worden, leek het mij een uitdagend afstudeeronderwerp.

Op het moment dat ik wilde beginnen met mijn afstuderen werd het ITS Edulab net opgezet. De samenwerking van de TU Delft met Rijkswaterstaat–AVV en Vervoer, waarbij studenten de mogelijkheid wordt geboden om met echte data te werken, sprak mij erg aan. Helaas is het niet gelukt om bij dit onderzoek hier gebruik van te maken aangezien de bestaande reistijdmetingen niet bruikbaar waren. Ik heb mijn afstuderen bij het ITS EduLab als stimulerend ervaren en ben enthousiast om mijn opgedane kennis toe te gaan passen.

Graag wil ik Serge Hoogendoorn en Hans van Lint van de TU Delft bedanken voor het begeleiden van mijn afstuderen vanaf het allereerste idee tot aan de laatste loodjes. De besprekingen heb ik als kritisch, zeer belangstellend en mededenkend ervaren. Daarnaast wil ik Sascha Hoogendoorn-Lanser (AVV), Henk Taale (AVV) en Andreas Hegyi (TU Delft) bedanken voor hun begeleiding en belangstelling.

Zwolle, 26 augustus 2007

Benno van der Griendt

Figuren

figuur 0-1 Prestaties van de methode op het gebied van de parameterschatting en het bepalen van de toestand voor verschillende combinaties van de netwerkopzet en de wijze waarop de synthetische data is gegenereerd.	viii
figuur 1-1 Onderzoeksofzet.....	9
figuur 2-1 Detectielussen in de A13 richting Den Haag bij knooppunt Ypenburg. Bron foto: [6].	11
figuur 2-2 Reistijdcamera's aan portalen boven de weg verzamelen voertuigenkentekens.	12
figuur 3-1 Trajectorie van twee voertuigen met dezelfde reistijd (t_{meting}) bij verschillende omstandigheden. Voertuig 1 (rood, onderbroken) heeft in het begin een lage snelheid terwijl voertuig 2 (blauw, doorgetrokken) pas vanaf de oprit een lagere snelheid heeft door bijvoorbeeld veel extra verkeer vanaf de oprit.	16
figuur 4-1 Fundamentele diagrammen die basisrelatie tussen snelheid en dichtheid (links) en intensiteit en dichtheid (rechts) visualiseren.....	19
figuur 4-2 Fundamenteel diagram met intensiteit uitgezet tegen dichtheid per strook. De stippen geven de verschillende toestanden aan. De lijnen tussen de stippen geven de schokgolven die de grens tussen twee toestanden vormen. Zie ook figuur 4-3.	21
figuur 4-3 Ruimte-tijd weergave van de file ontwikkeling ten gevolge van het ongeluk en de bijbehorende toestanden.	21
figuur 4-4 Voorbeeld van een trajectorie van een voertuig dat A passeert met zo'n 120 km/uur. Door een strookvermindering ontstaat congestie en waardoor de gemiddelde snelheid van het voertuig over het traject A-B daalt naar 53 km/uur.....	23
figuur 4-5 Met de PLSB methode wordt een trajectorie opgebouwd op basis van een aantal puntmetingen (pijlen) door het snelheidsverloop (gelijk aan de afgeleide van de trajectorie) geleidelijk te laten verlopen tussen twee meetlocaties.	24
figuur 6-1 Aan de hand van de reistijd- en detectielusmetingen worden voor het betreffende netwerk een aantal deeltjes gemaakt (verschillende parameters), doorgerekend (toedeling verkeer) en beoordeeld. Hiermee wordt de toestand bepaald en de volgende meting voorbereid.....	36
figuur 6-2 Gebruik van relatieve sigmafactoren [-2; -0.7; 0; 0.7; 2] om per deeltje de combinaties van absolute parameterwaardes vast te leggen voor één of twee te schatten parameters met elk een eigen range.....	40
figuur 6-3 De snelheden van de referentiesituatie.	41
figuur 6-4 Bepaling van de snelheden door het filter bij één fundamenteel diagram voor het gehele netwerk.	42
figuur 6-5 Bepaling van de snelheden bij opsplitsing van het netwerk en met verschillende fundamentele diagrammen per deelnetwerk.....	43
figuur 6-6 De ontwikkeling van de twee kritische snelheden per deelnetwerk.	43
figuur 6-7 De twee verdelingen boven (scores deeltjes) met verschillende spreidingen leiden tot een verschillende cumulatieve verdeling onder. Zo zijn, afhankelijk van de scores van de deeltjes verschillende factorwaardes te creëren (bij gebruik van dezelfde grenzen op de y-as).....	50
figuur 6-8 Voorbeeld van outputvenster gedurende de simulatie met fundamentele diagrammen (geschat en origineel, v-k en q-k) voor beide klassen. Rechts de toestandsbepaling tot dan toe.	52
figuur 6-9 Voorbeeld van de visualisatie van de scores per deeltje per soort metingen en voor de gecombineerd. Het rondje ($kC = 28$, $vC = 76$) geeft de gekozen waardes aan en het vierkantje ($kC = 24.9$, $vC = 78.8$) geeft de juiste waardes aan.....	53
figuur 6-10 Het testnetwerk met de ligging van de detectielussen, het reistijdtraject en de herkomsten en bestemmingen.	54
figuur 6-11 Snelheden geproduceerd zijn door Fastlane bij het genereren van de synthetische data (links) en door het filter (rechts). Horizontaal is de tijd uitgezet en verticaal de afstand ten opzichte van de het begin van link 2 in de stroomafwaartse richting.	55
figuur 6-12 Ontwikkeling van de schatting van de parameters: snelheid van klasse 1 bij vrije afwikkeling (bovenste, groen) en de kritische snelheid (onderste, zwart) ten opzichte van de werkelijke waardes (onderbroken lijnen). Tevens is de vaste parameterwaarde voor de snelheid van klasse 2 bij vrije afwikkeling te zien (midden, paars).	56
figuur 6-13 Screenshots van dichtheidplots op doorgaande hoofdweg van Fastlane simulatie om metingen te genereren (links) en van de bepaling door het filter (rechts).	56

figuur 6-14 Ontwikkeling van de schatting de snelheidsparameter van klasse 2 bij vrije afwikkeling (midden, paars) ten opzichte van de werkelijke waardes (onderbroken lijn). Tevens zijn de vaste parameterwaardes voor de snelheid van klasse 1 bij vrije afwikkeling (bovenste, groen) en de kritische snelheid (onderste, zwart) te zien.	57
figuur 6-15 Ontwikkeling van de schatting van de parameters: stremmingdichtheid (bovenste, blauw) en de kritische dichtheid (onderste, rood) ten opzichte van de werkelijke waardes (onderbroken lijnen).....	58
figuur 6-16 Screenshots van snelheidplots op doorgaande hoofdweg gedurende Fastlane simulatie om metingen te genereren (links) en van de bepaling door het filter (rechts).	58
figuur 6-17 Duidelijk verschil bij het schatten van de parameters bij test 3a en 3b voor de kritische snelheid (bovenste twee plots) en de kritische dichtheid (onderste twee plots) met 3 (linker plots) en 5 waardes per parameter (rechter plots).	60
figuur 6-18 De parameters van test 3c (linker twee plots) worden aanzienlijk beter geschat dan het eerste deel van test 3d (rechter twee plots).	61
figuur 6-19 De schatting van de parameterwaardes voor de stemmingsdichtheid, de snelheid bij vrije afwikkeling van klasse 1, en de kritische snelheid (doorgetrokken lijnen) ten opzichte van de referentiewaardes (gestippelde lijnen) gedurende 240 minuten.	64
figuur 6-20 De schatting van de parameterwaardes voor de kritische snelheid en de kritische dichtheid (doorgetrokken lijnen) ten opzichte van de waardes bij het creëren van de synthetische data met Fastlane (gestippelde lijnen) gedurende 240 minuten.....	65
figuur 6-21 Detail van netwerk met verschillende links en overgangen in aantal stroken, op- en afritten waardoor er veel potentiële bottlenecks zijn.....	66
figuur 6-22 Verschilplot bepaalde snelheden en werkelijke snelheden. De toestandsbepaling gedurende congesties is goed, alleen begint congestie 2 te vroeg en gaat de eerste congestie te lang door.	67
figuur 7-1 Links het Nederlandse hoofdwegennet (bron: Rijkswaterstaat) met de ligging van de A13. Rechts toont de omgeving in detail (bron: Google Earth) waarbij de A13 is gemarkeerd en de huidige cameralocaties zijn aangegeven met de witte stippen.....	70
figuur 7-2 Screenshot testnetwerk in Fastlane gebaseerd op A13 van Den Haag (knooppunt Ypenburg) richting Rotterdam (knooppunt Klein Polderplein).	72
figuur 7-3 Testnetwerk in FOSIM gebaseerd op A13 van Den Haag richting Rotterdam met aanduiding van de opritten/herkomsten (o), afritten/bestemmingen (d) en de gebruikte deelnetwerken. Zie ook bijlage 5.	72
figuur 7-4 Snelheidscontour van FOSIM simulatie voor referentiesituatie 1 met een interne bottleneck. Horizontaal de afstand (m) en verticaal de tijd (sec). Rode kleuren geven lage snelheden aan, groene hoge snelheden.	74
figuur 7-5 Locaties van de 40 dubbele detectielussen op de hoofdroute (A13) die gebruikt worden bij het testen vanaf Den Haag tot het Klein Polderplein.....	75
figuur 7-6 Reistijdtrajecten rondom aansluiting Delft Zuid.	76
figuur 7-7 Verschilplot van de snelheden bij de toestandsbepaling met alleen detectielussen ten opzichte van de werkelijke snelheden bij het genereren van de metingen. Rood: te hoge snelheid, blauw: te lage snelheid.....	80
figuur 7-8 Verschilplots van de toestandsbepaling A1 (links boven), A2 (rechts boven), A3 (links onder) en A4 (rechts onder) bij gebruik van alle detectielussen én reistijden ten opzichte van de werkelijke snelheden. Rood: te hoge snelheid, blauw: te lage snelheid.....	83
figuur 8-1 Detectoren die wordt vervangen bij S1-1 (links) en S1-2 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 1.....	85
figuur 8-2 Detectoren die wordt vervangen bij S2-1 (links), S2-2 (midden) en S2-3 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 2.....	86
figuur 8-3 Detectoren die wordt vervangen bij S3-1 (links), S3-2 (midden) en S3-3 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 3.....	86
figuur 8-4 Detectoren die wordt vervangen bij S4-1 (links), S4-2 (midden) en S4-3 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 4.....	87
figuur 9-1 Prestaties van de methode op het gebied van de parameterschatting en het bepalen van de toestand voor verschillende combinaties van de netwerkopzet en de wijze waarop de synthetische	

data is gegenereerd. De prestaties van de parameterschatting bij het gebruik van FOSIM data zijn onbekend omdat hier de modelparameters onbekend zijn..... 92

Tabellen

tabel 5-1 Score per methode voor verschillende punten: slecht (-), matig (o) of goed (+).	34
tabel 6-1 Nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en gebruikte standaarddeviatie per type meting [7, 8].	47
tabel 6-2 Turnfracties en verkeersvraag per uur gespecificeerd voor de tests.	54
tabel 6-3 Verkeerssituaties waarop de parameters van het FD betrekking hebben.....	62
tabel 7-1 Intensiteitenverloop per herkomst in stappen van 1800 seconden uitgedrukt in voertuigen per uur als invoer van FOSIM.	73
tabel 7-2 Herkomst-bestemmingsmatrix met fracties waarin verkeer van de 7 herkomsten zich verdeeld over de 9 bestemmingen.	73
tabel 7-3 Turnfracties afgeleid van HB-matrix en intensiteitenverloop uit FOSIM voor gebruik in Fastlane.....	74
tabel 7-4 Locaties van reistijdcamera's en afstand voor verschillende testtrajecten.....	75
tabel 7-5 Grootte van de ruis (uitgedrukt in een percentage van de werkelijke meetwaarde) verschilt per type meting. De waardes hebben invloed op de metingspecifieke bijdrages.	76
tabel 7-6 Startwaardes van parameters die gedurende de gehele simulatie gelden tenzij betreffende parameter geschat wordt door het filter. En in de laatste kolom de minimale waardes voor de sigma's indien de parameter geschat wordt.....	77
tabel 7-7 Fysieke grenzen en verkeerskundige voorwaardes waaraan parameterwaardes moeten voldoen.	77
tabel 7-8 Betekenis van R^2 om optredende combinaties van bepaalde en "werkelijke" snelheden te verklaren met het verband resulterende uit regressieanalyse.	78
tabel 7-9 Per (deel)netwerk de periodes waarvoor verschillende toestanden optreden bij de FOSIM metingen en gebruikt worden om de toestandsbepaling te beoordelen.....	79
tabel 7-10 Presteren van testen met huidige situatie (alleen detectielussen) voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart uitgedrukt in de RMSE per criteria.....	79
tabel 7-11 Presteren van testen met huidige situatie voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart beoordeeld met behulp van regressie (goed: $\beta = 1,0$; $\alpha = 0$).....	79
tabel 7-12 Determinatiecoëfficiënten voor toestandsbepaling met alleen detectielussen voor verschillende (deel)netwerken en periodes.....	80
tabel 7-13 Presteren van testen met detectielus- en reistijdmetingen voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart uitgedrukt in de RMSE per criteria.....	81
tabel 7-14 Presteren van testen met detectielus- en reistijdmetingen voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart beoordeeld met behulp van regressie (goed: $\beta = 1,0$; $\alpha = 0$).....	82
tabel 8-1 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 1.....	85
tabel 8-2 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 2.....	86
tabel 8-3 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 3.....	86
tabel 8-4 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 4.....	87
tabel 8-5 Indicatie kostprijs voor 3 stroken voor beide meetsystemen, gebaseerd op verhouding detectielussen:reistijdcamera's 1:3 en verscheidene indicaties [4, 5, 7, 15].....	87
tabel 8-6 Indicatie kostprijs per kilometer voor de huidige en additionele situaties de substitutie strategieën voor de aanleg en 10 jaar gebruik van gebruikte meetsystemen.....	88
tabel 8-7 Presteren van strategieën voor deelnetwerk 1 uitgedrukt in de RMSE per criteria ten opzichte van huidige en additionele testresultaten.	89
tabel 8-8 Presteren van strategieën voor deelnetwerk 1 per criteria ten opzichte van huidige en additionele testresultaten beoordeeld met behulp van regressie.	89

Samenvatting

Files zijn tegenwoordig niet meer weg te denken uit het dagelijkse verkeersbeeld. Dit wil niet zeggen dat het een geaccepteerd feit is. Zowel weggebruikers als wegbeheerders zijn gebaat bij een vermindering van het fileleed. Eén van de mogelijkheden is het zorgen voor een betere benutting van de beschikbare infrastructuur.

De betere benutting kan worden bereikt door middel van verkeersmanagement. Hiervoor is het nodig om weten wat de actuele verkeerstoestand is op alle locaties in het netwerk. Deze informatie wordt door verkeerscentrales gebruikt om het verkeer te managen en/of de weggebruikers te informeren. Het is niet mogelijk om op elk punt van het netwerk te meten. Daarom wordt al jaren de toestand geschat op basis van een systeem van detectielussen. Door de weggebonden eigenschap is dit systeem relatief kwetsbaar en moeilijk te onderhouden waardoor de kosten hoog zijn. De vraag is of het niet efficiënter en effectiever kan door alternatieve databronnen te gebruiken.

Er zijn steeds meer soorten gegevens binnen handbereik die mogelijk een indicatie kunnen geven van de toestand. Hiervan zijn reistijdmetingen er één. Van dit soort metingen is het onduidelijk hoe deze gebruikt kunnen worden bij het real-time bepalen van de toestand op de weg (toestandschatten). Zo zijn er geen methoden bekend en zijn de omstandigheden waaronder ze toegepast moeten worden ook onbekend.

Het onderwerp van dit onderzoek is datafusie van gegevens uit detectielussen en reistijdcamera's ten behoeve van een betere bepaling van de toestand op de weg. In dit onderzoek is gekeken in hoeverre reistijdmetingen gebruikt kunnen worden bij het maken van een toestandschatting. Reistijdmetingen hebben hele andere eigenschappen dan de huidige puntmetingen, wat zorgt voor een aantal problemen bij het gebruik er van. Ze hebben betrekking op een traject, op een wisselende periode en zijn "oude" data. Daarnaast kan dezelfde reistijd worden veroorzaakt door een oneindige hoeveelheid toestanden. Dit maakt dat bestaande methoden niet bruikbaar zijn en dat het hoogstwaarschijnlijk onmogelijk is om helemaal de detectielussen geheel te vervangen door reistijdcamera's. Naast de problemen met de verwerking van de reistijdmetingen is er weinig bekend over de toepassing van reistijden bij het bepalen van de toestand.

De probleemstelling luidt:

1. *Welke aanpak kan worden gebruikt om reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen te fuseren ten behoeve van real-time toestandschatten?*
2. *Welke verbeteringen zijn te behalen bij het gebruik van data uit reistijdcamera's naast de detectielusgegevens?*
3. *Wat is de optimale strategie bij het vervangen van detectielussen door reistijdcamera's?*

Methode (vraag 1)

Aangezien er voor het combineren van reistijdmetingen en detectielusgegevens ten behoeve van toestandschatting geen bestaande methoden beschikbaar zijn, zijn drie methoden geformuleerd om dit te bewerkstelligen. De methoden (filters) verschillen in het niveau en de volgorde waarop de beide databronnen gefuseerd worden. Ook de wijze waarop de toestand wordt geschat verschilt. De eerste twee methoden passen direct de toestand aan. Dit gebeurt opeenvolgend per databron. De mate waarin detectielusgegevens beschikbaar zijn is hierbij belangrijk. Het verschil tussen beide methoden komt er in grote lijnen op neer dat, bij het verwerken van de reistijden, de eerste alleen uitgaat van de huidige toestand. De tweede methode gaat ook uit van toestanden in het verleden (waarbij de reistijd is ontstaan).

De derde en uitgewerkte methode past de toestand niet direct aan, maar maakt gebruik van verschillende schattingen van de mogelijke verkeersontwikkeling. Deze ontwikkelingen worden deeltjes genoemd en zijn gebaseerd op de maatgevende eigenschappen van alle metingen. In dit geval betekent het dat de verkeersontwikkelingen even lang duren als de reistijdmeting en eindigen op het moment van meten. Voor de berekening van de verkeersontwikkeling wordt het 1^e orde verkeersmodel Fastlane gebruikt omdat het een inzichtelijk en goed bewerkbaar model is. Door per

deeltje een unieke combinatie van parameterwaardes te gebruiken ontstaan verschillende verkeersontwikkelingen en kunnen de optimale parameterwaardes worden geschat. Dit wordt gedaan aan de hand van het beoordelen van de best scorende parametercombinatie. De beoordeling van de beste parametercombinatie vindt plaats door de werkelijke metingen te vergelijken met nagebootste metingen van de verkeersontwikkeling. Zo wordt de optimale waarde van de parameters geschat en wordt de toestand daarvan afgeleid. Daardoor is de term "toestandsbepaling" van toepassing in plaats van "toestandschatten".

Uit de resultaten blijkt dat deze heuristiek een mogelijkheid biedt om de reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen te fuseren ten behoeve van real-time toestandsbepaling onder eenvoudige omstandigheden (netwerk en data). Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is gebruik gemaakt van de casestudie. Dit is een groter en complexer netwerk: de A13 in de richting van Den Haag naar Rotterdam. Tevens is de meetdata die gebruik wordt als input afkomstig van een ander verkeersmodel dan in het filter wordt gebruikt. Bij die omstandigheden blijkt dat de methode een aantal tekortkomingen heeft. Zo gaat het er van uit dat één combinatie van parameters geldig kan zijn voor het gehele netwerk. Dit, samen met de relatief eenvoudige versie van het verkeersmodel, zorgt voor matige prestaties bij congestie op een deel van het netwerk. Bij de referentiesituatie treedt dan namelijk lokaal een capaciteitsreductie (capaciteitsval) op. De gebruikte aanpak voorziet niet in dit lokale verschijnsel en verlaagt de capaciteit van het gehele netwerk. Deels is dit opgelost door het netwerk op te delen in twee deelnetwerken. De opsplitsing van het netwerk in twee delen zorgt voor een beter toestandsbepaling. Hierbij is de locatie van de grens van grote invloed. Dit zorgt er voor dat de aanpak minder generiek wordt dan aanvankelijk gedacht. Een ander minpunt van de aanpak is dat slechts een beperkt aantal parameters geschat kan worden. Hierdoor is het niet mogelijk om meer dan twee deelnetwerken te gebruiken. Gezien de situatie zou een verdere opsplitsing wel betere resultaten opleveren.

		opzet netwerk			
		eenvoudig	complex		
synthetische data gegenereerd met	Fastlane	goed	goed	prestatie schatting parameters	
		goed	matig		
	FOSIM	?	?		prestatie bepaling toestand
		matig	slecht		

figuur 0-1 Prestaties van de methode op het gebied van de parameterschatting en het bepalen van de toestand voor verschillende combinaties van de netwerkopzet en de wijze waarop de synthetische data is gegenereerd.

Aanvullende en vervangende waarde (vraag 2 en 3)

Met de aangepaste methode zijn, aan de hand van een casestudie, de tweede en derde vraag beantwoord. De gebruikte casesituatie is een traject van bijna 20 km lang (de A13 van Den Haag naar Rotterdam). De synthetische detectielus- en reistijdmetingen zijn gegenereerd met het microscopische verkeersmodel FOSIM, omdat dit model de verkeersafwikkeling op snelwegen reëel benadert.

Voor het bepalen van de aanvullende waarde (vraag 2) is eerst een toestand bepaald door alleen de gegevens uit detectielussen (snelheden en intensiteiten) te gebruiken. Hierbij blijkt dat het filter slecht in staat is om de snelheden goed te bepalen. Gemiddelde fouten van ongeveer 20 km/uur treden op en gedurende congestie zelfs hoger. Deels komt dit door de systematische fout als gevolg van het negeren van de capaciteitsval.

Voor de toestandsbepaling met reistijden worden metingen van één traject met variërende lengtes (1608, 1943, 2528 en 3028 meter) rondom de belangrijkste bottleneck gebruikt. In het algemeen geldt dat, in tegenstelling tot wat men zou verwachten, de toestandsbepalingen verslechteren bij gebruik van de reistijdmetingen. Alleen wanneer men kijkt naar het deelnetwerk waar de trajecten zich in bevinden, is een kleine winst te boeken bij afnemende congestie. Verder valt op dat de grootte

van de fout daalt naarmate de trajectlengte toeneemt. Aangezien slechts van een klein deel van het netwerk reistijdmetingen gebruikt worden kan dit zowel duiden op een goede als slechte bruikbaarheid bij toestandsbepaling.

Ondanks de theoretisch, mogelijke bijdrage van reistijdmetingen zijn de bepaalde toestanden bij nagenoeg alle testen slecht te noemen. Op basis van dit onderzoek is te concluderen dat, bij gebruik van de beschreven methode en testopzet, reistijdmetingen geen duidelijke aanvullende waarde hebben voor het bepalen van de toestand. De gebruikte methode en testopzet laten niet toe om algemene uitspraken te doen over de aanvullende waarde van reistijdmetingen. Hiervoor is nader onderzoek nodig.

Voor het bepalen van de vervangende waarde van reistijdmetingen (derde vraag) zijn dezelfde trajecten gebruikt. Per traject zijn meerdere configuraties van het aantal gebruikte detectielussen getest. De strategieën verschillen daardoor in de trajectlengte van de reistijdmetingen, de configuratie van de detectielussen gedurende het traject en uiteraard de kosten per kilometer.

De resultaten zijn vergelijkbaar met die van de aanvullende testen. Zo zijn de fouten groter dan wanneer geen reistijden gebruikt worden. Zeker voor het deel van het netwerk waar geen reistijdtraject in ligt. Het valt echter op dat het verschil tussen veel of weinig detectoren gedurende het reistijdtraject nihil is. Volgens de uitgevoerde testen maakt het nauwelijks uit of veel of weinig detectielussen gebruikt worden wanneer men reistijdmetingen toepast: de fout blijft even groot. De kosten per kilometer dalen echter aanzienlijk met een toenemende trajectlengte en een afnemend gebruik van detectielussen.

Nog meer dan bij het antwoord op vraag 2 moeten de resultaten echter worden bekeken vanuit het perspectief waarin ze zijn gegeneerd. Op basis van het uitgevoerde onderzoek is het dan ook onmogelijk om de derde vraag te beantwoorden. Ook hier is het advies om de testopzet aan te passen en dan met name op het gebied van het aantal reistijdtrajecten.

Aanbevelingen methode

- Het opnemen van de capaciteitsval in het fundamenteel diagram of het toepassen van een verkeersmodel dat hier wel rekening mee houdt;
- Meer opsplitsingen mogelijk maken om te kunnen onderzoeken of het verder opsplitsen van het netwerk leidt tot verbeteringen en te kunnen bepalen of het nuttig is om de methode toe te passen op kleinere (deel)netwerken;
- Het aanpassen van het filter om meerdere reistijdmetingen te kunnen verwerken. Dit is nodig om testen mogelijk te maken met een hogere dekkinggraad van reistijden (zie aanbevelingen vervolgonderzoek);
- Het mogelijk maken om simultaan meerdere filters toe te passen voor opeenvolgende delen van het netwerk. Hiervoor moeten de filters onderling communiceren over de situatie op de grensvlakken. Dit is nodig om per reistijdtraject of bottleneck een aparte toestandsbepaling uit te voeren;
- Het toepassen van een andere methode, omdat de huidige methode:
 - Geheel vertrouwt op het gebruikte verkeersmodel;
 - Geen directe relatie tussen de metingen en de geschatte parameters (en dus de toestandbepaling) gebruikt;
 - De score van de deeltjes niet afhangt van de optredende toestand of een indicatie hoeveel de toestand afwijkt.
- Verifiëren of de gebruikte aannames correct zijn.

Aanbevelingen vervolgonderzoek

- Onderzoeken of het relatief goed scoren van lange reistijdtrajecten betekent dat reistijden een positieve of negatieve bijdrage zijn door het verhogen van de dekkinggraad van de reistijdmetingen;
- Onderzoeken hoe goed de toestandsbepaling is bij het optreden van een bottleneck op onverwachte locaties, zoals in het geval van een ongeluk of een externe bottleneck;
- Bepalen of reistijdcamera's gebruikt kunnen worden om intensiteiten te bepalen. En zo ja, is een herverdeling van de detectieluslocaties in combinatie met het gebruik van reistijdmetingen een interessante toepassing;

Datafusie detectielusgegevens en reistijdmetingen

- Onderzoeken wat de resultaten zijn als andere soorten data worden gebruikt, zoals de rekenkundig gemiddelde snelheden uit de detectielussen om zo te voorkomen dat de rekenkundige naar harmonische gemiddeldes omgezet hoeven te worden;
- Bepalen of het gebruik van specifieke reistijdmetingen per gebruikersklasse een interessante verbetering is.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	III
FIGUREN	IV
TABELLEN	VI
SAMENVATTING	VII
INHOUDSOPGAVE	2
BEGRIPPENLIJST	5
1 INLEIDING	7
1.1 AANLEIDING VOOR ONDERZOEK	7
1.2 PROBLEEMSTELLING EN DOEL	8
1.3 ONDERZOEKSVRAGEN EN ONDERZOEKSOPZET	8
1.4 WERKWIJZE	9
1.5 LEESWIJZER	10
2 SITUATIEBESCHRIJVING	11
2.1 HUIDIGE MEETNETTEN	11
2.2 HUIDIG GEBRUIK EN MOGELIJKHEDEN VAN REISTIJDMETINGEN.....	12
2.3 NATIONAAL DATA WAREHOUSE	13
2.4 MAATSCHAPPELIJK RELEVANTIE	13
3 PROBLEEMANALYSE EN AFBAKENING	15
3.1 METHODOLOGISCHE PROBLEMEN BIJ GEBRUIK VAN REISTIJDMETINGEN.....	15
3.2 MAATSCHAPPELIJKE PROBLEMEN EN VRAAGSTUKKEN	16
3.3 UITGANGSPUNTEN, RANDVOORWAARDEN EN AANNAMES	17
4 THEORETISCHE STUDIE	19
4.1 FUNDAMENTELE RELATIE EN DIAGRAM & SCHOKGOLFTHEORIE	19
4.2 HARMONISCH VERSUS REKENKUNDIGE GEMIDDELDE SNELHEDEN	22
4.3 TRAJECTORIËNMETHODE: PLSB	22
4.4 VERKEERSMODEL: FASTLANE	24
4.5 FILTERTECHNIEKEN.....	25
4.5.1 <i>(Extended) Kalman Filter</i>	26
4.5.2 <i>Particle filter</i>	26
4.6 DATAFUSIE	27
5 METHODEN VOOR FILTEREN EN ASSIMILEREN DATA	29
5.1 INSTANTANE TRAJECTORIËN MET KALMAN FILTER	29
5.2 HISTORISCHE TRAJECTORIËN MET KALMAN FILTER.....	31
5.3 PARAMETERSCHATTING OP BASIS VAN EEN DEELTJESFILTER	32
5.4 WELKE METHODE UITWERKEN EN IMPLEMENTEREN?	33
6 UITWERKING EN IMPLEMENTATIE METHODE	35
6.1 OPZET: RAAMWERK EN KERN.....	35
6.2 STAP 1 & 2: START VAN HET FILTER	37
6.3 STAP 3: EIGENSCHAPPEN PER DEELTJE.....	38
6.3.1 <i>Inloed capaciteitsval voor parameterkeuze</i>	40
6.4 STAP 4 & 5: CREËREN DEELTJES.....	43
6.5 STAP 6: NABOOTSEN REISTIJDMETINGEN	44
6.6 STAP 7 & 8: NABOOTSEN DETECTORMETINGEN EN EINDTOESTANDEN.....	44
6.7 STAP 9: WEEGFACTOREN REISTIJD- EN DETECTORMETINGEN	45
6.8 STAP 10: DATAFUSIE: ASSIMILEREN VAN METINGEN	46

6.9	STAP 11: BEPALING TOESTAND	48
6.10	STAP 12: VASTSTELLEN NIEUWE WAARDES PARAMETERS EN SIGMA'S.....	48
6.11	VERIFICATIE ALGORITME IN EENVOUDIG TESTOMGEVING	51
6.11.1	<i>Netwerk en (synthetische) data</i>	<i>54</i>
6.11.2	<i>De resultaten van de testen</i>	<i>55</i>
6.11.3	<i>Conclusie verificatie en mogelijk te schatten parameters.....</i>	<i>62</i>
6.12	VERIFICATIE ALGORITME MET NETWERK A13	63
6.12.1	<i>Verschillende maximale snelheden</i>	<i>63</i>
6.12.2	<i>Mogelijke parametercombinaties.....</i>	<i>64</i>
6.12.3	<i>Bottlenecks</i>	<i>65</i>
6.12.4	<i>Welke parametercombinaties schatten bij testen A13.....</i>	<i>67</i>
7	MAXIMALE VERBETERINGEN DOOR DATAFUSIE VOOR A13	69
7.1	OPZET ONDERZOEK: CASESTUDIE A13.....	69
7.1.1	<i>Specificeren testnetwerk.....</i>	<i>71</i>
7.1.2	<i>Referentiesituatie.....</i>	<i>72</i>
7.1.3	<i>Genereren synthetische meetgegevens.....</i>	<i>74</i>
7.1.4	<i>Parameterwaardes</i>	<i>77</i>
7.1.5	<i>Criteria</i>	<i>77</i>
7.2	RESULTATEN: MAXIMAAL TE BEHALEN VOORDEEL VOOR A13	79
7.2.1	<i>Huidige situatie.....</i>	<i>79</i>
7.2.2	<i>Datafusie: additionele waarde</i>	<i>80</i>
7.3	CONCLUSIE	83
8	VERVANGENDE WAARDE VAN REISTIJDMETINGEN VOOR DE A13.....	85
8.1	STRATEGIEËN	85
8.1.1	<i>Traject 1 – 1608 meter: 2 strategieën</i>	<i>85</i>
8.1.2	<i>Traject 2 – 1943 meter: 3 strategieën</i>	<i>86</i>
8.1.3	<i>Traject 3 – 2528 meter: 3 strategieën</i>	<i>86</i>
8.1.4	<i>Traject 4 – 3028 meter: 3 strategieën</i>	<i>86</i>
8.2	KOSTEN	87
8.3	RESULTATEN DATAFUSIE: SUBSTITUTIE WAARDE	88
8.4	CONCLUSIE	90
9	CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	91
9.1	CONCLUSIE	91
9.1.1	<i>Vraag 1: Welke aanpak kan worden gebruikt om reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen te fuseren ten behoeve van real-time toestandsbepaling?.....</i>	<i>91</i>
9.1.2	<i>Vraag 2: Welke verbeteringen zijn te behalen bij het gebruik van data uit reistijdcamera's naast de detectielusgegevens?</i>	<i>93</i>
9.1.3	<i>Vraag 3: Wat is de beste strategie bij het vervangen van detectielussen door reistijdcamera's?.....</i>	<i>94</i>
9.2	AANBEVELINGEN	94
9.2.1	<i>Aanbevelingen met betrekking tot het filter.....</i>	<i>94</i>
9.2.2	<i>Aanbevelingen voor vervolgonderzoek.....</i>	<i>96</i>
	REFERENTIES	97
	BIJLAGEN.....	99
1	BASISNETWERK NDW	100
2	AFWEGING METHODEN.....	101
3	SCHEMA FILTER: RAAMWERK EN KERN.....	103
4	RESULTATEN VERIFICATIE TESTSOORT 3	104
5	DETAILS TESTNETWERK	112

6	RESULTATEN IN BEELD: HUIDIGE SITUATIE.....	113
7	RESULTATEN IN BEELD: TOEGEVOEGDE WAARDE	114
8	RESULTATEN IN BEELD: VERVANGENDE WAARDE	118

Begrippenlijst

Hierna volgen een aantal begrippen of afkortingen die in dit rapport veelvuldig worden gebruikt. Sommige hiervan zijn in het Engels, maar zeer gebruikelijk binnen het vakgebied. Indien de (vertaalde) begrippen niet als bekend verondersteld mogen worden dan zijn deze kort toegelicht of wordt verwezen naar een paragraaf.

AC	Afbouwende congestie
Assimileren	Gelijkvormig maken, gelijkstellen (als vorm van datafusie)
Bias	Systematische fout
Datafusie	Combineren van verschillende datatypes
Dichtheid	Aantal voertuigen dat zich op een wegvak rijstrook van een bepaalde lengte bevindt, meestal uitgedrukt in voertuigen per kilometer per rijstrook
FD	Fundamenteel diagram, zie ook subparagraaf 4.1
Flux	Verandering in aantal voertuigen per cel doordat de voertuigen bij simuleren van ene naar andere cel gaat
HB-matrix	Herkomst-bestemmingsmatrix: aantal voertuigen per herkomst-bestemming combinatie
Intensiteit	Aantal voertuigen dat per tijdseenheid een bepaald punt passeert
Kritische dichtheid	De dichtheid waarbij congestie optreedt, zie subparagraaf 4.1
Kritische snelheid	De snelheid op het moment dat congestie optreedt, zie subparagraaf 4.1
NDW	Nationaal Data Warehouse, zie paragraaf 2.3
OC	Opbouwende congestie
PAE	Personenauto-equivalent: het ruimtebeslag dat een voertuig inneemt ten opzichte van een personenauto
PF	Particle Filter, zie subparagraaf 4.5.2
RT	Real-time
Stremmingsdichtheid	De maximale dichtheid (waarbij het verkeer stil staat), zie subparagraaf 4.1
TDI	Toerit Doseer Installatie
Toestand	De verkeerssituatie van het gehele netwerk, uitgedrukt in dichtheid of snelheid, per segment van maximaal een paar honderd meter
Toestandsbepaling	Het bepalen van de verkeerssituatie (snelheid of dichtheid) op de weg op basis van de geschatte parameters met de methode zoals beschreven in hoofdstuk 6
Trajectorie	De locatie als functie van de tijd dat een individueel voertuig aflegt, zie subparagraaf 4.3
Turnfractie	De verdeling van de ingaande verkeersstroom over de uitgaande bestemmingen (bijvoorbeeld op een splitsing)
VA	Vrije afwikkeling (geen congestie)

1 Inleiding

Files zijn tegenwoordig niet meer weg te denken uit het dagelijkse verkeersbeeld. Het is zelfs zo dat files op de radio vaak alleen nog maar genoemd worden als ze langer zijn dan een paar kilometer, een onverwachte oorzaak hebben of zich op een ongebruikelijke locatie bevinden. Men zou dus zeggen dat de weggebruiker er aan gewend is en zich er bij neerlegt. Dit is echter (nog) niet het geval, uit de maatschappelijke discussies via verschillende media blijkt het onderwerp toch nog altijd veel irritatie op te wekken.

Naast de weggebruikers zijn er de wegbeheerders die zich er allerm minst bij neer willen leggen. Hoewel algemeen wordt aangenomen dat een filevrij Nederland voorlopig ondenkbaar is, worden toch veel pogingen gedaan om het fileleed (iets) te verzachten. Zo is door de overheid de Nota Mobiliteit [11] opgesteld waarin doelstellingen worden geformuleerd op dit gebied. Ondanks de toenemende vraag moet de bereikbaarheid verbeterd worden en tevens de betrouwbaarheid verhoogd worden. De Nota geeft hiervoor drie oplossingsrichtingen aan. Twee van deze richtingen zijn op de lange termijn gericht en onderhevig aan verschillende maatschappelijke belangen en (milieu)wetgeving: het aanleggen van meer infrastructuur en het op andere wijze betalen voor de infrastructuur. De derde richting is meer op de korte termijn te bereiken en gaat uit van een betere benutting van de beschikbare infrastructuur.

1.1 Aanleiding voor onderzoek

De betere benutting kan worden bereikt door middel van verkeersmanagement. Voordat men in de verkeerscentrale het verkeer kan managen door het bij te sturen of de gebruiker te informeren is het nodig om te weten wat de toestand op de weg is. Hierbij moet bij dit onderzoek de toestand worden gezien als:

De toestand is de verkeerssituatie van het gehele netwerk, uitgedrukt in dichtheid of snelheid, per segment van maximaal een paar honderd meter.

Aangezien het financieel en praktisch niet haalbaar is om overall observatiecamera's te plaatsen en mensen daar naar te laten kijken bestaan hiervoor andere methoden. Momenteel wordt daarvoor een uitgebreid meetsysteem van detectielussen gebruikt. Deze meten op een groot deel van het Nederlandse hoofdwegennet ongeveer elke 500 meter de snelheid en intensiteit van de verkeersstroom. De gegevens worden gebruikt om voor het gehele netwerk, ook waar geen metingen van zijn, een toestandsschatting te maken. Het belang van deze toestandsschatting is dat het bijvoorbeeld een indicatie van de snelheid op de weg geeft en het kan gebruikt worden om de weggebruiker te informeren en/of te sturen.

Het systeem van detectielussen wordt al jaren succesvol gebruikt voor onder andere toestandsschattingen. Dit is echter geen garantie dat dit ook gaat gelden voor de toekomst. De vraag is of het niet efficiënter en effectiever kan. Steeds meer wordt geprobeerd om ook andere databronnen toe te passen voor het inschatten van de toestand op de weg. Grofweg zijn hier twee redenen voor. Door technische ontwikkelingen zijn steeds meer verschillende data beschikbaar (aanbodzijde), zoals bijvoorbeeld GSM-data. Aan de andere kant is er de vraagzijde waarbij gezocht wordt naar aanvullingen op en/of alternatieven voor de huidige systemen.

Eén van de alternatieve databronnen zijn metingen van de gerealiseerde reistijd van weggebruikers. Reistijdmetingen hebben hele andere eigenschappen dan de huidige puntmetingen afkomstig van detectielussen, wat zorgt voor een aantal problemen bij het gebruik er van. Zo hebben ze betrekking op een traject en een wisselende periode (ter grootte van de meting zelf) in plaats van één locatie en een vast tijdsinterval. Door deze verschillen zijn de reistijdmetingen niet zomaar om te zetten en te gebruiken in huidige methoden voor toestandsschattingen. Tevens komen reistijden pas beschikbaar nadat de voertuigen het traject hebben voltooid. Het zegt dus iets over de toestand zoals deze in het verleden is geweest. Wanneer men wil weten wat de toestand op het netwerk is op het moment dat de metingen beschikbaar komen lijkt dit dus "oude" data te zijn en is de bruikbaarheid dus niet evident. Daarnaast kan dezelfde reistijd worden veroorzaakt door een oneindige hoeveelheid

toestanden. Dit maakt dat bestaande methoden niet bruikbaar zijn en dat het hoogstwaarschijnlijk onmogelijk is om helemaal de detectielussen geheel te vervangen door reistijdcamera's. Naast deze problemen met de verwerking van de reistijdmetingen zijn weinig onderzoeken gedaan naar de toepassing van reistijden bij het bepalen van de toestand. Het is dan ook interessant om meer inzicht te krijgen in wat reistijden kunnen betekenen voor een betere toestandsschatting.

1.2 Probleemstelling en doel

Het onderwerp van dit onderzoek is datafusie van gegevens uit detectielussen en reistijdcamera's. In dit onderzoek zal worden gekeken in hoeverre reistijdmetingen gebruikt kunnen worden bij het maken van een toestandsschatting.

De probleemstelling van het onderzoek is opgebouwd uit drie delen, te verwoorden in de volgende vragen:

1. *Welke aanpak kan worden gebruikt om reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen te fuseren ten behoeve van real-time toestandsschatten?*
2. *Welke verbeteringen zijn te behalen bij het gebruik van data uit reistijdcamera's naast de detectielusgegevens?*
3. *Wat is de beste strategie bij het vervangen van detectielussen door reistijdcamera's?*

De term real-time staat voor het schatten van de toestand op het moment van meten. De aanpak moet in staat zijn de twee verschillende databronnen te gebruiken voor één toestandsschatting. De hieruit resulterende aanpak moet gericht zijn op het gebruik voor dynamisch verkeersmanagement. Het schatten of voorspellen van de reistijden die weggebruikers zullen gaan ervaren worden in deze studie buiten beschouwing gelaten.

De tweede vraag is er op gericht om de kwaliteit van de toestandsschattingen te verbeteren om zo het verkeer beter te kunnen managen en de weggebruiker beter te kunnen informeren. Bij de derde vraag draait het in eerste instantie niet om het verhogen van de kwaliteit, maar de vervangbaarheid van detectielussen door reistijdmetingen.

Het onderzoek heeft als doel meer inzicht geven in de mogelijkheden die reistijdmetingen bieden. Tevens zal worden gekeken onder welke omstandigheden dit is. Bij al deze vragen speelt de afstand tussen twee opeenvolgende cameraposities een belangrijke rol en ook de dichtheid van het meetnet met detectielussen.

1.3 Onderzoeksvragen en onderzoeksopzet

Om antwoord te geven op de hoofdvragen, worden de volgende onderzoeksvragen gesteld:

- a) Hoe worden detectielussen en reistijdmetingen gebruikt?
- b) Welke ontwikkelingen zijn er gaande en wat is het belang van deze ontwikkelingen?
- c) Wat zijn de problemen bij het gebruik van reistijden?
- d) Wat zijn de uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames?
- e) Welke technieken kunnen gebruikt worden bij de datafusie tussen reistijdmetingen en detectielusgegevens?
- f) Welke mogelijkheden zijn er om een aanpak te ontwikkelen en welke is het meest belovend?
- g) Welke keuzes moeten worden gemaakt bij de implementatie?
- h) Hoe presteert de ontwikkelde methode en wat zijn de implicaties voor de methode?
- i) Voor welke casestudie wordt de methode getest?
- j) Hoe presteert de ontwikkelde methode bij het gebruik van enkele detectielussen?
- k) Hoe presteert de ontwikkelde methode bij het gebruik van detectielussen in combinatie met reistijden?
- l) Hoe presteert de ontwikkelde methode bij het gebruik van reistijden in plaats van detectielussen?
- m) Is er een toegevoegde en vervangende waarde van reistijdmetingen, en zo ja wat is deze?
- n) Hoe kan de methode verbeterd worden en de wat is interessant om verder te onderzoeken?

In figuur 1-1 is te zien welke onderzoeksvragen horen bij welk onderdeel van de probleemstelling. En in welk hoofdstuk antwoord wordt gegeven op de onderzoeksvragen. Ter beantwoording van de tweede en derde hoofdvraag wordt gebruik gemaakt van een casestudie. De A13 van Den Haag naar Rotterdam staat model voor deze casestudie. Dit is één van de meest drukke snelwegen van Nederland en op korte termijn wordt dit traject voorzien van meetsystemen om, over relatief korte afstanden, reistijden te meten.

PROBLEEMSTELLING	Hoofdstuk	Geeft antwoord op onderzoeksvraag:
1. Welke aanpak kan worden gebruikt voor de datafusie?	2 Situatiebeschrijving	a, b
	3 Probleemanalyse	c, d
	4 Theoretische studie	e
	5 Methoden voor filteren en assilieren data	f
	6 Uitwerken en implementeren methode	g, h
2. Wat is de aanvullende waarde reistijdmetingen?	7 Maximale verbeteringen door datafusie voor A13	i, j, k
3. Wat is de vervangende waarde reistijdmetingen?	8 Vervangende waarde reistijdmetingen A13	l
CONCLUSIE	9 Conclusies en aanbevelingen	m, n

figuur 1-1 Onderzoeksopzet

1.4 Werkwijze

Bij het ontwikkelen van een methode wordt onder andere de kennis uit literatuur gebruikt. Deze kennis is gericht op de vraag hoe de datafusie tot stand gebracht kan worden en de problemen die er bij komen kijken. Tevens is kennis nodig over de werking en opzet van verkeersmodellen en hoe met het tijdsverschil tussen beide databronnen omgegaan kan worden. Wanneer er geen geschikte methode beschikbaar is over de datafusie van reistijdmetingen en detectielussen in de literatuur, moet een methode ontwikkeld worden.

Voor het ontwikkelen van een methode worden verschillende mogelijkheden geformuleerd en daarna wordt de meest belovende uitgewerkt. De aanpak die wordt ontwikkeld en geïmplementeerd, moet uiteraard getest worden. Om te voorkomen dat deze testen worden verstoord door meetfouten van echte data of verschillende benaderingen van de verkeersafwikkeling wordt gecontroleerde synthetische data gebruikt. "Gecontroleerde" synthetische data houdt in dat de meetgegevens gecreëerd zijn met een gelijke benadering van de verkeersafwikkeling als in de methode wordt gebruikt. Tevens worden dezelfde verkeersvraag en overige parameters gebruikt. Zo wordt voorkomen dat eventuele fouten veroorzaakt worden door een verkeerde benadering van de verkeersafwikkeling.

Voor de beantwoording van de tweede en derde vraag is het gebruik van gecontroleerde synthetische data niet realistisch. Van het huidige wegennet zijn de gewenste metingen uit detectielussen wel beschikbaar, maar niet de reistijdmetingen op afstanden die kort genoeg zijn voor toepassing in dit onderzoek. Dit maakt het gebruik van synthetische data onvermijdelijk. Om het enigszins realistisch te maken wordt het microscopisch model FOSIM (Freeway Operations SIMulation) gebruikt om meetgegevens te generen. Dit model is een realistisch model voor het verkeersgedrag op snelwegen. Met deze data zal de huidige situatie gemodelleerd worden waarmee vergeleken wordt na het

toevoegen van reistijdmetingen. Daarna wordt gekeken wat de invloed is van het toevoegen van reistijdmetingen over een lengte van zo'n 1500, 2000, 2500 en 3000 meter. Deze afstanden zijn gebaseerd op inschattingen in het kader van het NDW over wat de optimale afstand is. Voor de beantwoording van de derde vraag wordt via verschillende strategieën een aantal lussen genegeerd. Hierdoor dalen de kosten en kan een afweging worden gemaakt tussen de dalende kosten en waarschijnlijk een afnemende kwaliteit. Dit moet leiden tot conclusies over de aanvullende en vervangende waarde van reistijdmetingen. Aan de hand van de verkregen inzichten zal worden afgesloten met de formulering van een aantal aanbevelingen voor verder onderzoek of verbetering van de methode.

1.5 Leeswijzer

Het eerste deel van het rapport, zie figuur 1-1, staat in het teken van de ontwikkeling van een methode (vraag 1). Daarna worden een aantal testen uitgevoerd met deze methode om meer inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van reistijdmetingen.

Voor het ontwerpdeel van dit rapport wordt ter inleiding in hoofdstuk 2 de huidige situatie beschreven en wordt ingegaan op beide databronnen en de maatschappelijke relevantie om dit onderzoek uit te voeren. Hoofdstuk 3 analyseert de problemen. Tevens wordt het onderzoek afgebakend middels een aantal uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames.

Hoofdstuk 4 gaat meer in op de theoretische achtergrond van dit onderwerp. Zo worden enkele verkeertheorieën toegelicht alsmede de werking van het verkeersmodel dat een essentiële rol speelt. Tevens wordt ingegaan op twee andere belangrijke technische termen: filtertechnieken en datafusie.

In hoofdstuk 5 wordt een aanzet gedaan om de eerste vraag te beantwoorden door een drietal methoden te formuleren die de datafusie mogelijk te maken. Uit deze methoden wordt een keuze gemaakt welke in hoofdstuk 6 verder wordt uitgewerkt. Hierbij zijn de verschillende keuzes, die gemaakt zijn bij het uitwerken en implementeren, beargumenteerd. Tevens zal aan de hand van een aantal testen de correcte werking van het algoritme worden getest.

Aan de hand van het geïmplementeerde filter wordt in hoofdstuk 7 de tweede vraag beantwoord. Zo wordt gekeken in hoeverre datafusie van reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen een aanvulling kan vormen ten opzichte van de toestandschatting met alleen detectielussen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de casestudie van de A13.

Daarna wordt in hoofdstuk 8 bekeken of, bij gebruik van het ontwikkelde filter, een antwoord kan worden gegeven op de derde vraag. Hiervoor zijn een aantal strategieën getest waarbij de trajectlengte van de reistijdmetingen verschilt en het gebruik van detectielussen wordt gevarieerd. Ook hiervoor wordt de casestudie van de A13 gebruikt.

Tot slot worden in hoofdstuk 9 de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek beschreven. De conclusies zijn gebaseerd op de resultaten uit het onderzoek naar de aanvullende en vervangende waarde van de reistijdmetingen. De aanbevelingen hebben betrekking op verbetering van de aanpak en verder onderzoek.

2 Situatiebeschrijving

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de huidige stand van zaken betreffende het onderwerp van deze studie. Met name de huidige wijze waarop metingen worden gedaan en toegepast en de verschillende ontwikkelingen die gaande zijn. Dit hoofdstuk is dan ook bedoeld voor lezers die nauwelijks bekend zijn met het onderwerp.

De eerste paragraaf gaat in op de huidige meetnetten en het gebruik hiervan. Daarbij ligt de focus op het gebruik van toestandschatting, maar worden ook andere toepassingen vermeld. In de paragraaf daarna wordt het (mogelijke) gebruik van de reistijdmetingen verwoord. Momenteel is het Nationaal Data Warehouse in ontwikkeling. Wat dit is en de relatie tot het onderwerp wordt toegelicht in paragraaf 2.3. Naast deze mogelijkheden en ontwikkelingen wordt tot slot in paragraaf de maatschappelijke relevantie besproken.

2.1 Huidige meetnetten

In Nederland wordt tot op heden hoofdzakelijk het Monitoring Casco (MoniCa) meetsysteem gebruikt voor het weergeven van de toestand op het Nederlandse hoofdwegennet. Het systeem van Rijkswaterstaat bestaat uit voornamelijk¹ uit dubbele detectielussen (ook wel inductielussen genoemd) in de snelwegen. In het westen van Nederland liggen deze lussen in de meeste hoofdwegen op een onderlinge afstand van enkele honderden meters. In de rest van Nederland liggen de lussen op de belangrijke wegen en rondom knooppunten met een lagere dichtheid.



figuur 2-1 Detectielussen in de A13 richting Den Haag bij knooppunt Ypenburg. Bron foto: [6].

De detectoren uit het MoniCa-meetnet produceren een aantal gegevens. Sinds enkele jaren zijn de gegevens niet alleen per meetraai beschikbaar, maar ook per strook voor de betreffende meetlocatie. De belangrijkste gegevens die het systeem produceert ten behoeve van toestandschatting zijn intensiteiten en snelheden. Hierbij moet worden opgemerkt dat het systeem rekenkundig gemiddelde snelheden produceert, terwijl voor verkeersmodellering deze wijze van middelen niet gewenst is. In subparagraaf 4.2 wordt hier nader op ingegaan. De gegevens kunnen worden weergegeven per 1, 5 of 15 minuten. De 1-minuutgegevens zijn voor het real-time toestandschatten uiteraard het meest interessant.

Nast het gebruik van de gegevens uit de meetlussen voor toestandschatten worden de gegevens ook voor andere doeleinden gebruikt. Voor veel van deze applicaties is het van essentieel belang dat intensiteiten beschikbaar zijn. Hiermee moet men bij de kostenbepaling rekening houden met het oog op vervanging van het MoniCa-systeem, zie ook hoofdstuk 8. De belangrijkste toepassingen zijn:

- Het direct aansturen van DRIPs en de signaalborden op het Nederlandse hoofdwegennet. Dit zijn borden boven de weg die weggebruikers informeren over de filelengtes of de maximale snelheid aangegeven in het geval van een file stroomafwaarts. Daarnaast wordt deze informatie, via de VCNL (Verkeerscentrum Nederland) van Rijkswaterstaat, doorgespeeld aan diverse partijen (services providers) als de radio, routeplanners etc;
- De Automatische Incident Detectie. Door (onverwachte) metingen te analyseren kan in een vroeg stadium een ongeluk en de locatie er van worden gedetecteerd. Zo kunnen hulpdiensten snel aangestuurd worden;
- Het schatten van reistijden;
- Het gebruik voor onderzoeken en evaluaties.

¹ Daarnaast zijn er ook nog andere wijzen van meten als radardetectie en infrarood waarvan de metingen beschikbaar zijn via het MoniCa-systeem.

Hoewel het wel mogelijk is, maakt een TDI (Toerit Doseer Installatie) meestal geen gebruik van de metingen uit het MoniCa-meetnet, maar maakt gebruik van een eigen set detectielussen.

Naast deze conventionele meetmethode zijn de laatste jaren vele ontwikkelingen gaande die een alternatief of een aanvulling op het MoniCa moeten vormen. Interessante vragen hierbij zijn:

1. Kan de kwaliteit van toestandschatting verbeterd worden;
2. Kunnen de kosten van het toestandschatten worden verlaagd;
3. Hoe kunnen meer factoren (zoals het weer) worden meegenomen;
4. Wat is de beste manier om een toestandschatting te kunnen doen voor hoofdwegen met een huidige lage dichtheid of het onderliggend wegennet;
5. Is het mogelijk om een voorspelling van de toestand te geven?

Voorbeelden hiervan zijn het gebruik van gegevens uit GSM's om snelheden op het wegennet te bepalen of het combineren van weersvoorspellingen met de verkeersdrukke. De resultaten zijn zeer uiteenlopend en veelal nog in ontwikkeling. Hierdoor komen wel steeds meer en verschillende soorten data beschikbaar van het wegennet in Nederland. Door de vele initiatieven komt dit bij verschillende partijen en in verschillende formaten beschikbaar. Tevens worden de gegevens lokaal opgeslagen en voornamelijk binnen het eigen project gebruikt. Dit is zonde en leidt mogelijk tot dubbel werk en investeringen, zie ook paragraaf 2.3. In de volgende paragraaf zal worden ingegaan op reistijdmetingen als databron.

2.2 Huidig gebruik en mogelijkheden van reistijdmetingen

Het begrip reistijd is niet eenduidig en leidt nogal eens tot verwarring. Zo worden reistijden in het dagelijks gebruik vaak gebruikt als een eindproduct van een berekening of schatting en als informatie voor de reiziger of andere gebruikers (te verwachten reistijd). Daarnaast kunnen reistijden gebruikt worden als input van een berekening of schatting (actuele reistijdmetingen) en daarmee leiden tot andere informatie, niet per se in de vorm van reistijden. Een derde toepassing van historische reistijden is het gebruik ter referentie en evaluatie. Dit omvat onder andere evaluaties van maatregelen, het valideren en kalibreren van modellen en algoritmes [14].

Het huidige gebruik van reistijden is voornamelijk aan de outputzijde, de eerste wijze van gebruik dus. Zo zijn er verschillende toepassingen waarbij reistijden worden geschat. MoniBas is zo'n systeem waarbij via een aantal algoritmes de data uit MoniCa wordt gebruikt, aangevuld en bewerkt om reistijden te kunnen schatten. Een ander voorbeeld dat gebruik maakt van snelheden uit puntmetingen is de PLSB-methode die in subparagraaf 4.3 nader wordt besproken. Daarnaast zijn er ook systemen die gebruik maken van andere gegevensbronnen, zoals MTS (Mobile Traffic Services) dat reistijden schat op basis van GSM gegevens.

Bij deze studie gaat het om de tweede wijze van gebruik. Voor het toestandschatten wordt dit nog niet gebruikt en wordt verwezen naar de inhoud van dit rapport voor de mogelijkheid om dit type data te gebruiken en de bruikbaarheid hiervan.

Reistijden worden in het algemeen gemeten door gebruik te maken van kentekenherkenning. Camera's op portalen boven de weg (zie figuur 2-2) maken op twee vaste locaties foto's van de voertuigen waaruit het kenteken wordt verkregen. Met een matching-algoritme worden de metingen van de verschillende camera's vergeleken en aan elkaar gekoppeld. Zo ontstaat de reistijd van een voertuig tussen de cameraposities. Uiteraard zijn minimaal twee camera's nodig, maar het is ook mogelijk om meerdere trajecten na elkaar te gebruiken door camera's toe te voegen.



figuur 2-2 Reistijdcamera's aan portalen boven de weg verzamelen voertuigenkentekens.

De gegevens uit deze camera's kunnen, naast het gebruik voor het genereren van reistijden, ook nog voor andere doeleinden gebruikt worden. Net als bij detectielussen gaat het hierbij soms om unieke

gegevens. Ook hierbij zal dus gerealiseerd moeten worden dat de kosten van een dergelijk systeem niet alleen aan de toepassing voor toestandschatten toegewezen moeten worden. Voorbeelden die een meetsysteem met kentekencamera's biedt zijn:

- Het herleiden van de samenstelling van het verkeer. Van sommige voertuigklassen is de beginletter van het kenteken gelijk, bijvoorbeeld bussen (B), opleggers (O) en motoren (M).
- Het meten van intensiteiten. Van alle passerende voertuigen wordt immers het kenteken geregistreerd door de camera's. Deze eigenschap is niet meegenomen in deze studie.
- Het bepalen van herkomst-bestemmingspatronen. De camera's moeten hiervoor rondom een op- en/of afrit geplaatst. Voertuigen die immers maar één van de camera posities passeren moeten op het tussengelegen traject de hoofdsnelweg verlaten of opgereden zijn. De vraag is of deze gegevens bruikbaar zijn bij real-time toepassingen in relatie tot de afstand tussen de camera's en de aansluitingen. Zeker bij afslaand verkeer is het de vraag of een voertuig traag of afgeslagen is.

In principe generen de camera's geen videobeelden, het gebruik voor observaties is dus helaas niet mogelijk. Omgekeerd is het momenteel vaak niet mogelijk om de camera's die gebruikt worden voor observaties te gebruiken om kentekens uit te herleiden.

2.3 Nationaal Data Warehouse

Als reactie op de enorme groei in verschillende soorten verkeersgegevens uit verscheidene initiatieven zet Rijkswaterstaat-AVV, samen met andere partners, momenteel het Nationaal Data Warehouse (NDW) op. De ambitie is om met het opzetten van de database om deur-tot-deur reisplanningen mogelijk te maken voor gebruikers en voor wegbeheerders optimaal verkeersmanagement uit te kunnen voeren [13]. "Een essentiële voorwaarde daarvoor is dat op ieder moment van alle snelwegen en op belangrijke, provinciale en stedelijke wegen de actuele verkeerssituatie bekend is."

Centraal staat de standaardisatie en coöperatie met betrekking tot meetgegevens van het Nederlandse hoofdwegennet. Daarvoor worden allerlei verkeersgegevens gestructureerd opgeslagen. In tegenstelling tot de huidige wijze van opslaan waarbij de afzonderlijke inwinnende partijen hun data decentraal opslaan. En zo is het veelal niet toegankelijk en opvraagbaar voor iedereen. Het gaat hierbij om verschillende gegevens zoals intensiteiten, puntsnelheden, voertuigcategorieën, gerealiseerde en geschatte reistijden [12]. Om uniforme toepassingen mogelijk te maken worden afspraken gemaakt over het formaat, de betrouwbaarheid en de beschikbaarheid van de data.

Dit alles wordt gedaan om de beschikbare data maximaal te kunnen benutten ten behoeve van een verbeterde verkeersinformatie en verkeersmanagement. Een betere informatievoorziening leidt tot een betere betrouwbaarheid en voorspelbaarheid en daardoor minder economische schade ten gevolge van congestie. Beter verkeersmanagement kan de benutting van de wegen verhogen en daardoor mogelijk de congestie doen verminderen.

In het kader van het NDW worden momenteel met verschillende partijen afspraken gemaakt over de (door)levering van data die in de database opgeslagen moet worden. Daarnaast wordt er naar gestreefd om meer en andere data in te winnen. Hiertoe is een basisnetwerk (zie bijlage 1) gespecificeerd met verschillende niveaus wegen. Per niveau wordt een ondergrens vastgesteld waaraan de data moeten voldoen.

Wat betreft het gebruik van reistijden worden in het kader van het NDW ook afspraken gedaan. Deze zijn echter gebaseerd op enkele inschattingen en (nog) niet gebaseerd op onderzoek dat aantoonde wat de optimale afstand is. Men acht een afstand tussen twee camera's van 1500 meter gewenst, maar omdat dit financieel waarschijnlijk niet haalbaar is, wordt nu gesproken over een afstand van 3000 meter. Een overweging bij deze keuze is dat de reistijden maximaal zo'n 5 minuten oud zou mogen zijn. Hetgeen neerkomt op een minimale snelheid van 36 km/uur.

2.4 Maatschappelijk relevantie

Zoals ook in paragraaf 2.3 is gesteld zijn er in het kader van het NDW wel een aantal eisen met betrekking tot reistijdmetingen. Maar deze zijn slechts gebaseerd op een algemene inschatting van hetgeen wenselijk is. Voordat men daadwerkelijk het wegennet gaat voorzien van camera's is het van

belang om te onderzoeken wat de optimale omstandigheden zijn, zie ook hoofdstuk. Zeker gezien de grote investeringen die hierbij gemoeid zijn.

Deze investeringen worden gedaan met het oog op een maatschappelijke winst. In de Nota Mobiliteit [11] wordt onder andere gesproken over een betere bereikbaarheid door het faciliteren van snel, betrouwbaar en veilig vervoer. Dit uit maatschappelijk en economisch belang. Files zorgen immers voor irritaties bij weggebruikers, en extra kostenposten voor gebruikers. Daarnaast wordt de belasting van het verkeer op het milieu steeds belangrijker in de maatschappelijke discussie.

Voor het bereiken van de doelstellingen uit dit beleidsdocument zijn drie oplossingsrichtingen mogelijk. Het aanleggen van nieuwe infrastructuur en (een andere wijze van) beprijzen zijn twee lange termijn oplossingen. Deze zijn tevens onderhevig zijn aan veel publieke discussies en aangescherpte (milieu)wetgeving. Het efficiënter gebruiken van bestaande infrastructuur is daarentegen meer een oplossing die op de korte termijn gerealiseerd kan worden. Daarom is verkeersmanagement een interessante optie om te beschouwen.

Naast de inwinning van meetgegevens speelt de toestandschatting een belangrijke rol bij verkeersmanagement. Verkeersmanagement is er op gericht om het wegennet, gegeven een fysieke capaciteit, maximaal te benutten. Deze verhoogde benutting moet er voor zorgen dat de economische schade door congestie wordt beperkt. Tevens biedt een goede toestandschatting de basis voor het voorspellen van de verkeersontwikkeling in de nabije toekomst. Dit kan positieve effecten hebben op een verhoogde betrouwbaarheid.

Naast een verhoogde kwaliteit is er een andere wijze waarop winst geboekt kan worden. In dit geval betreft het niet het aanvullen van de bestaande metingen, maar het vervangen hiervan. Door het vervangen van de ene databron door de andere kunnen besparingen gedaan worden. In dit geval zou het onderhoudsgevoelige en kostbare meetnet van MoniCa-detectielussen deels vervangen kunnen worden door reistijdcamera's. Deze camera's zijn weliswaar twee tot drie duurder dan detectielussen per locatie, maar wellicht zijn er minder nodig, zie ook paragraaf 8.2. Hierbij dient de kwaliteit van de toestandschatting dus niet af te nemen, maar de totale kosten wel. Opgemerkt moet worden dat bij een eventuele vervanging van (een deel van) het huidige meetsysteem de gegevens ook door verscheidene andere applicaties worden gebruikt, zie ook paragraaf 2.1. Veel van deze toepassingen kunnen niet gebaseerd worden op een schatting van de toestand (tenzij deze uiterst betrouwbaar en nauwkeurig is). Daardoor zullen de kostenbesparingen beperkt zijn.

Om bij beide mogelijkheden een (maatschappelijk) voordeel te behalen speelt het combineren van verschillende gegevens een belangrijke rol. Het op een slimme wijze combineren wordt ook wel datafusie genoemd. In paragraaf 4.6 wordt ingegaan waarom datafusie kan bijdragen aan beter resultaat.

3 Probleemanalyse en afbakening

Het gebruik van reistijdmetingen is niet vanzelfsprekend bij het toestandschatten. Momenteel worden vooral reistijden afgeleid van een toestand, zie ook paragraaf 2.2. Dit is echter de omgekeerde richting van wat nodig is voor het schatten van de toestand. Wanneer men reistijden als databron ziet stuit men op een aantal principiële problemen door de kenmerken van reistijdmetingen. Voor een beter begrip wordt dit in de eerste paragraaf uiteengezet. In de tweede paragraaf worden de maatschappelijke achtergronden van het probleem uiteengezet. Tot slot wordt in paragraaf 3.3 het onderzoek afgebakend aan de hand van uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames.

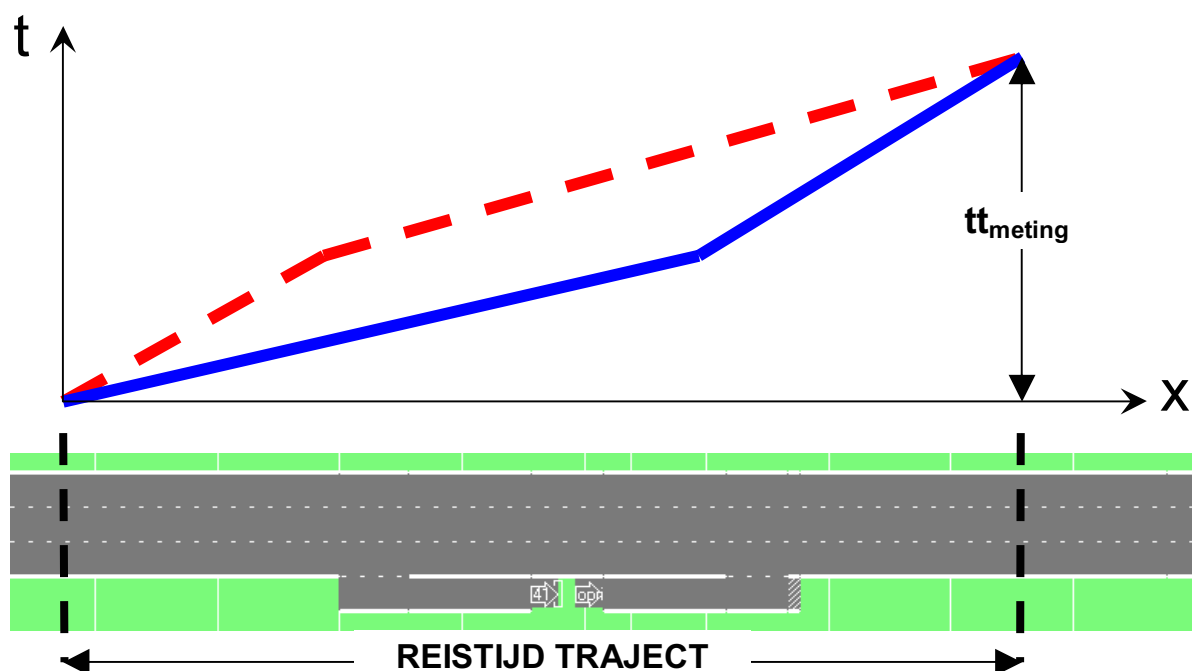
3.1 Methodologische problemen bij gebruik van reistijdmetingen

Bij de huidige wijze van toestandschatten wordt onder andere gebruik gemaakt van filters zoals later wordt beschreven in paragraaf 4.4. De filters verschillen in aanpak maar hebben een aantal eigenschappen die het moeilijk maken om zonder aanpassingen reistijden te gebruiken voor het schatten van de toestand. Zo wordt per vaste filterstap één of meerdere verkeersontwikkelingen berekend op basis van een verkeersmodel. Om de dynamica in de lengterichting van de weg te kunnen simuleren wordt gebruik gemaakt van meerdere cellen per wegvak² met elk een eigen toestand. Deze cellen zijn zo'n 250 meter en vele malen korter zijn dan potentiële trajecten voor reistijdmeting, zie ook paragraaf 2.3.

De vaste filterstap is de eerste reden waarom reistijden moeilijk gebruikt kunnen worden bij deze filters. Hoewel reistijden veelal groter zijn dan de filtertijdstep, zou dit niet een probleem hoeven te zijn. Maar doordat de reistijdmetingen veranderen bij wisselende omstandigheden hebben dit soort data betrekking op een veranderende tijdsperiode. Hierdoor is het niet mogelijk om de meting te relateren aan één enkele of een vast aantal filterstappen. En zo is het dus ook moeilijk te bepalen welke verkeersontwikkelingen gecorrigeerd moeten worden aan de hand van de metingen.

Een ander aspect is dat de reistijdmetingen betrekking hebben op een aantal cellen in plaats van één zoals bij puntmetingen. Hierdoor is niet een exacte toestand uit de metingen af te leiden voor een betreffende cel. Het is immers een combinatie van celtoestanden die de totale toestand bepaald welke leidt tot een bepaalde reistijd. Dit kan echter op vele manieren. In figuur 3-1 worden twee extreme mogelijkheden getoond. Zo kan een bepaalde reistijd worden veroorzaakt door langzaam rijdend verkeer tot aan een afslag waar veel verkeer gebruik van maakt waarna de snelheid per cel omhoog gaat (rood, onderbroken). Een andere mogelijkheid is dat het verkeer tot de oprit flink door kan rijden, maar door een hoge toestroom van het verkeer de snelheden afnemen op het laatste deel (blauw, doorgetrokken).

² Een wegvak wordt gekenmerkt door gelijke eigenschappen als: het aantal stroken en de maximumsnelheid. De lengte van een wegvak wordt ook beperkt door de afstand tussen knopen die mede nodig zijn voor aansluitingen.



figuur 3-1 Trajectorie van twee voertuigen met dezelfde reistijd (tt_{meting}) bij verschillende omstandigheden. Voertuig 1 (rood, onderbroken) heeft in het begin een lage snelheid terwijl voertuig 2 (blauw, doorgetrokken) pas vanaf de oprit een lagere snelheid heeft door bijvoorbeeld veel extra verkeer vanaf de oprit.

Uiteraard zijn vele andere mogelijkheden denkbaar om tot dezelfde reistijd te komen. Wanneer dit verkeerskundige fenomeen wordt genegeerd, zou men de reistijden kunnen gebruiken door te veronderstellen dat de snelheden in alle cellen gelijk zijn. Dit zou echter, zeker bij de op- en afbouw van congestie erg onrealistisch zijn en hoogstwaarschijnlijk leiden tot een slechte toestandschatting. Het gebruik van detectielussen gedurende het traject zou het mogelijk maken om onderscheid te maken, maar deze zijn meestal niet aanwezig op alle tussengelegen cellen. Het is dus de vraag of het mogelijk is om alle detectielussen te vervangen.

Daarbij komt dat reistijden in wezen oude data zijn: ze komen immers pas beschikbaar na het voltooien van de rit en zeggen dus voor een groot deel iets over het verleden en niet over het heden. Juist dit heden is belangrijk bij het real-time schatten.

Om reistijden te kunnen gebruiken voor real-time toestandschatten is dus een methodiek nodig die rekening houdt met de hiervoor genoemde eigenschappen van deze databron. Kort gezegd is een methode nodig welke om kan gaan met een wisselende periode waarop de metingen betrekking hebben en het verkeerskundig correct relateren van de meting aan de verschillende cellen.

3.2 Maatschappelijke problemen en vraagstukken

Het huidige meetnet zoals dat is beschreven in hoofdstuk 2 bestaat voornamelijk uit meetlussen. Deze lussen zijn relatief onderhoudsgevoelig doordat ze in de weg zitten en daardoor beschadigd kunnen raken bij bijvoorbeeld te veel zwaar vrachtverkeer. Deze weggebonden eigenschap heeft verder het nadeel dat ze vervangen moeten worden zodra de asfaltlaag vervangen wordt. Voor het vervangen van de lussen is het noodzakelijk de weg af te zetten. Ook dit is een kostbare zaak en wordt met maatschappelijk kapitaal betaald. Een ander nadeel is dat de lusgegevens soms een (structurele) fout bevatten en uit verkeerskundig oogpunt³ verkeerde snelheden genereren nauwkeurig zijn.

Bovengenoemde nadelen zijn een reden dat het interessant is om te kijken of reistijdmetingen gebruikt kunnen worden om (een deel van) de taken van de lussen over te nemen of aan te vullen.

³ Bij de huidige versie van het MoniCa-systeem worden rekenkundig gemiddelde snelheden gegeven in plaats van harmonische gemiddelde snelheden, zie ook subparagraaf 4.2.

Deze metingen worden vergaard met camera's boven de weg die met kentekenregistratie werken. Doordat deze niet weggebonden zijn, is de kans op beschadiging kleiner. Daarnaast is de nauwkeurigheid van de metingen ook erg goed.

Wanneer een techniek is gevonden om de reistijden te gebruiken bij toestandschatten is het de vraag onder welke omstandigheden deze het beste werken. In het kader van het NDW, zie paragraaf 2.3, worden hier enkele inschatting over gedaan, maar onderzoek moet aantonen of deze ook kloppen. En of de kwaliteit van de toestandschatten daarbij een verbetering is ten opzichte van wat nu wordt gebruikt. Daarnaast spelen de kosten die er mee gemoeid zijn een belangrijke rol. Eén van de redenen om een te kijken naar een alternatief voor detectielussen is immers het feit dat het huidige meetsysteem hoge kosten met zich meebrengt. Bij het beoordelen van de bruikbaarheid van reistijdmetingen is het dan ook interessant om te zien of de verbeterde kwaliteit opweegt tegen de kosten die aan het nieuwe meetsysteem verbonden zijn. Hierbij moet bedacht worden dat het geheel vervangen van de detectielussen heel onwaarschijnlijk is doordat deze ook worden gebruikt voor andere toepassingen en hoogstwaarschijnlijk nodig zijn om onderscheid te maken tussen meerdere mogelijke toestanden behorende bij één reistijdmeting (zie ook de subparagraaf hiervoor).

3.3 Uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames

In deze paragraaf zullen een aantal uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames worden omschreven die bij het onderzoek een afbakende rol spelen. Dit is gedaan omdat het onderzoek anders te uitgebreid wordt. Deels zijn deze van tevoren opgesteld, maar soms bleek het ook gedurende de ontwikkeling van de methode nodig te zijn om keuzes te maken. Hierna is een opsomming gegeven van de betreffende punten.

- Het geheel afschaffen van de detectielussen is niet mogelijk om een aantal redenen. Ten eerste worden de detectielussen ook voor andere toepassingen gebruikt, zie ook paragraaf 2.1. En aangezien een enkele reistijdmeting veroorzaakt kan worden door oneindig veel toestanden (zie subparagraaf 3.1) blijven detectielussen waarschijnlijk nodig om onderscheid te maken.
- Er zal niet worden gekeken naar een andere configuratie van de detectielussen naast het negeren van een deel van de huidige lussen. Hoewel dit een interessant vraagstuk is levert het teveel vrijheidsgraden op om dit gedegen uit te zoeken binnen dit project.
- Aangenomen wordt dat gegevens over herkomst-bestemmingspatronen bekend zijn. In werkelijkheid is dit vaak niet zo, maar het goed bepalen van de bijdrage van reistijdmetingen is niet gebaat bij deze belangrijke onzekerheid. Voordat de optimale configuratie, zie hoofdstuk 9, wordt toegepast is het uiteraard raadzaam om dit te onderzoeken.
- De metingen (zowel uit de detectielussen als de reistijdcamera's) zijn per minuut beschikbaar.
- De metingen die gebruikt worden zijn reeds gecorrigeerd en aangevuld. Dit bekend dat de snelheden harmonisch gemiddeld zijn (zie subparagraaf 4.2) en ontbrekende data is aangevuld.
- Het algoritme moet in staat zijn om minimaal één traject en de bijbehorende reistijdmetingen te kunnen gebruiken. Wanneer meerdere trajecten en metingen gebruikt kunnen worden, zal dit realistischer zijn, maar wellicht ook complexer.
- Bij reistijdmetingen wordt een mogelijke invloed van het verschil in de verdeling van vertrektijdstoppen en de verdeling van aankomsttijdstoppen voor dezelfde groep voertuigen door het verschil in reistijden buiten beschouwing gelaten.
- Voor het simuleren van het verkeer wordt het verkeersmodel Fastlane, versie 2007-21-02 fase 2 (zie paragraaf 4.4 voor een korte beschrijving) gebruikt. De voordelen hiervan is dat het een snel en inzichtelijk verkeersmodel is en zich goed leent voor aanpassingen. Om dezelfde reden zal de deterministische variant worden gebruikt. Tevens biedt dit model goede resultaten voor een "simpel" eerste orde model.
- Hoewel Fastlane een multiuserclass model is en gebruik van een oneindige hoeveelheid gebruikersklassen mogelijk maakt, wordt bij deze studie uitgegaan van slechts twee klassen: personenauto's en vrachtverkeer.
- Als netwerk zal de A13 in de richting van Den Haag naar Rotterdam gebruikt worden. de maatgevende spitsperiode hierbij is de avondspits. Bij het simuleren wordt er van uit gegaan dat gedurende vier uur (van 15u tot 19u) zowel vrije afwikkeling plaatsvindt, congestie opbouwt en afbouwt.

- Voor de ligging van de detectoren wordt zoveel als mogelijk uitgegaan van de huidige ligging van de detectielussen op het beschouwde netwerk, de A13 Den Haag – Rotterdam.
- Voor de ligging is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van portalen (waar de camera's aan bevestigd moeten worden)
- Wanneer wordt gesproken over detectielussen wordt er van uitgegaan dat ze bestaan uit een dubbele lus (zoals gebruikelijk op het Nederlandse hoofdwegennet) zodat ook snelheidsmetingen mogelijk zijn.
- De TDI's (Toerit Doseer Installaties) die onder andere bij Delft Zuid staat wordt buiten beschouwing gelaten bij het simuleren.
- Bij de berekening van de kosten voor beide meetsystemen worden de totale kosten in rekening gebracht en aangenomen dat de meerwaarde van beide systemen voor andere toepassingen gelijk zijn.
- Personenverkeer (gebruikersklasse 1) wordt onder andere gekenmerkt door een lengte van 7,5 meter, houdt 1,2 seconden afstand tot hun voorligger en een heeft wettelijk toegestane snelheid van 120 km/uur.
- Vrachtverkeer (gebruikersklasse 2) wordt onder andere gekenmerkt door een lengte van 15 meter, houdt 1,8 seconden afstand tot hun voorligger en een heeft wettelijk toegestane snelheid van 80 km/uur.
- De herkomst-bestemmingspatronen zijn gebaseerd op schattingen. Ter indicatie zijn gegevens uit RegioLab Delft (<http://www.regiolab-delft.nl>) gebruikt. De intensiteiten zijn aangepast om een realistisch verkeersbeeld (twee bottlenecks na de opritten van Rijswijk en Delft-Zuid) als referentiesituatie in FOSIM te creëren.

4 Theoretische studie

In hoofdstuk 2 is een algemene beschrijving van de huidige situatie gegeven. In dit hoofdstuk zal nader worden ingegaan op de theoretische aspecten van dit onderzoek. Zo zal in het kort worden ingegaan op verkeerskundige theorieën en begrippen⁴ die in de hoofdstukken hierna herhaaldelijk aangehaald zullen worden. Om te voorkomen dat dit een erg uitgebreid geheel wordt, worden slechts die aspecten behandeld die voor de rest van het onderzoek van belang zijn. Veel van deze informatie is bekend uit colleges, dictaten [9, 17] en internet.

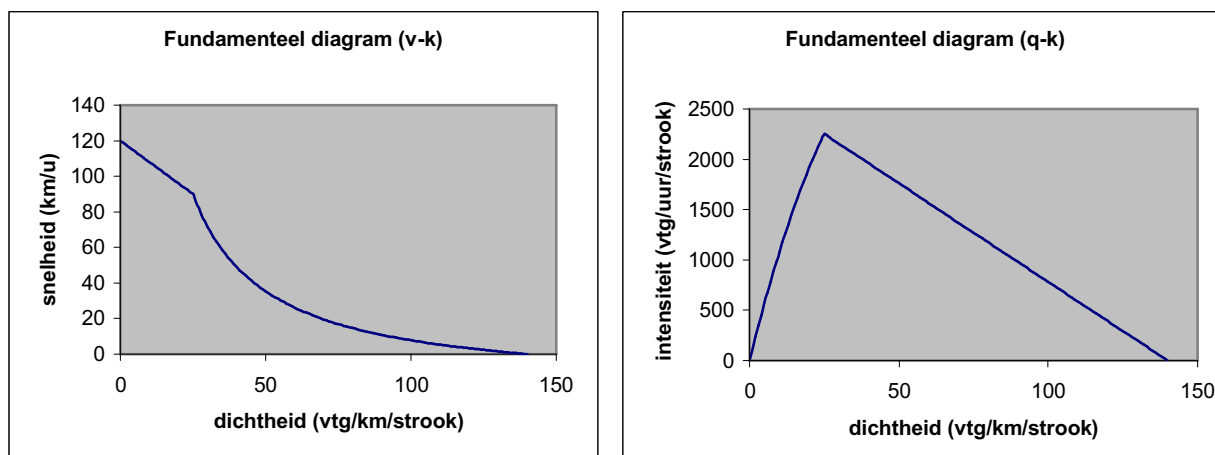
In de eerste paragraaf zal worden ingegaan op hoe de drie belangrijke (toestand)grootheden aan elkaar gerelateerd zijn en de gevolgen voor verkeersstroomtheorieën. Daarna wordt in paragraaf 4.2 ingegaan op verschillende wijzen van het middelen van de snelheid dat belangrijk is bij metingen. In de paragraaf daarna wordt enige theorie rondom de relatie tussen de toestand (snelheid) en reistijden besproken. In paragraaf 4.5 wordt ingegaan op filtertechnieken die worden gebruikt bij toestandschatting. Tot slot wordt kort ingegaan op datafusie en de voordelen die dit kan bieden.

4.1 Fundamentele relatie en diagram & schokgolftheorie

In dit onderzoek zal gebruik gemaakt worden van een macroscopisch verkeersmodel, zie ook paragraaf 4.4. Hierbij wordt de verkeers-toestand beschreven door middel van de intensiteit (q), snelheid (v) en dichtheid (k). Binnen de verkeerskunde wordt de relatie tussen deze grootheden de fundamentele relatie (of basisrelatie) genoemd:

$$q = k \cdot v \quad (4-1)$$

Een veelvoorkomende, bijbehorende term is het fundamenteel diagram (of basisdiagram) waarin de relatie is gevisualiseerd. Door gebruik te maken van (4-1) is het mogelijk om zowel de snelheid (zie figuur 4-1 links) als de intensiteit (figuur 4-1 rechts) uit te drukken in relatie tot de dichtheid.



figuur 4-1 Fundamentele diagrammen die basisrelatie tussen snelheid en dichtheid (links) en intensiteit en dichtheid (rechts) visualiseren.

De vorm van een FD wordt meestal bepaald door de snelheid als functie van de dichtheid te definiëren. De functie die hiervoor in Fastlane wordt verondersteld (4-2) bestaat uit twee delen. Ten eerste is er een deel dat geldt voor verkeerssituaties waarin vrije afwikkeling van het verkeer mogelijk is en het dus niet wordt belemmerd door de verkeerssituatie stroomafwaarts. Het andere deel betreft de afwikkeling in geval van congestie waarbij de verkeersstroom juist wel wordt bepaald door hetgeen stroomafwaarts gebeurt.

⁴ Tevens wordt verwezen naar de begrippenlijst.

$$v = f(k) = \begin{cases} v_f - \frac{v_f - v_c}{k_c} \cdot k & k \leq k_c \\ \frac{v_c \cdot k_c}{k} \cdot \left(1 - \frac{k - k_c}{k_{\max} - k_c}\right) & k > k_c \end{cases} \quad (4-2)$$

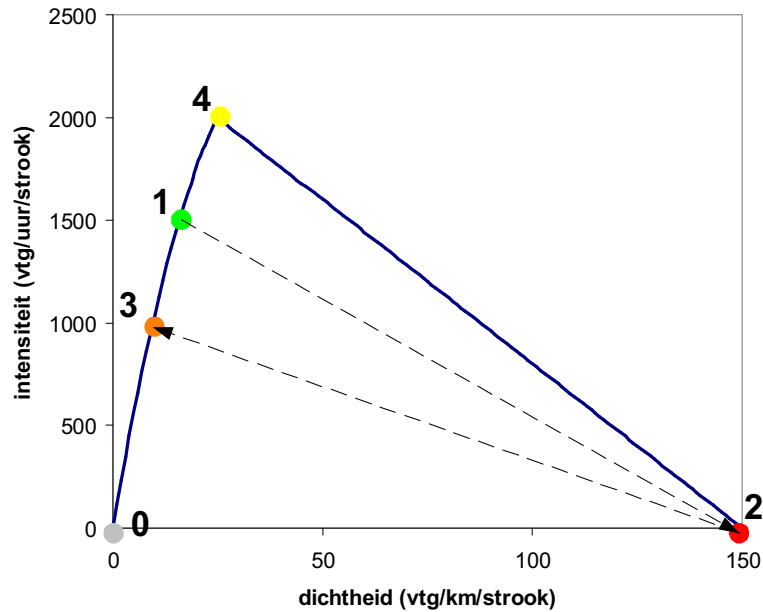
De parameters die hierin voorkomen zijn vier van de vijf parameters die de fundamentele diagrammen karakteriseren en een belangrijke rol spelen bij macroscopische verkeersmodellen. De kritische dichtheid (k_c) bepaalt onder meer of de verkeerstoestand vrije afwikkeling betreft of van congestieve aard is en dus welk deel van de snelheidsfunctie gebruikt moet worden. Meestal ligt deze waarde tussen de 22 en 25 personenauto-equivalenten per kilometer. Wat er op neerkomt dat de overgang van vrije afwikkeling en congestie optreedt bij een gemiddelde volgafstand van 45 tot 50 meter.

De tweede parameter is de snelheid bij vrije afwikkeling (v_f) die afhangt van wettelijk maximaal toegestane snelheid, voertuig- en bestuurskarakteristieken van de betreffende gebruikersklasse. Deze parameter is de enige parameter die verschilt per gebruikersklasse. Voor personenauto's is de waarde in de meeste gevallen zo'n 120 km/uur en voor vrachtverkeer 80 a 85 km/uur. Zodoende kunnen verschillende fundamentele diagrammen per klasse ontstaan. Hierbij wijkt alleen het deel behorende bij vrije afwikkelingen af aangezien v_f geen invloed heeft op de verkeersafwikkeling bij congestie.

De snelheid die correspondeert met de kritische dichtheid is de kritische snelheid (v_c) en geeft dus de snelheid aan waarbij de congestieve toestand ontstaat of oplost. Uit verschillende onderzoeken komt naar voren dat deze waarde bij normale omstandigheden tussen de 80 en 90 km/uur ligt. De vijfde parameter die niet direct in (4-2) voorkomt is het product van de eerder besproken kritische dichtheid en kritische snelheid. Dit levert de maximale intensiteit (q_c) op, beter bekend als de capaciteit. De bijbehorende kritische snelheid is dus de snelheid waarbij de weg zo efficiënt mogelijk wordt gebruikt. Tot slot is er de stemmingsdichtheid (k_{\max}) die aangeeft hoeveel voertuigen zich maximaal per kilometer rijstrook kunnen bevinden. Zoals te zien is in figuur 4-1 is dit een ongewenste situatie aangezien de intensiteit dan nul is doordat het verkeer geheel stil staat. Afhankelijk van de voertuiglengtes en de minimale afstand tussen voertuigen ligt deze waarde meestal tussen de 125 en 165 personenauto-equivalenten per kilometer.

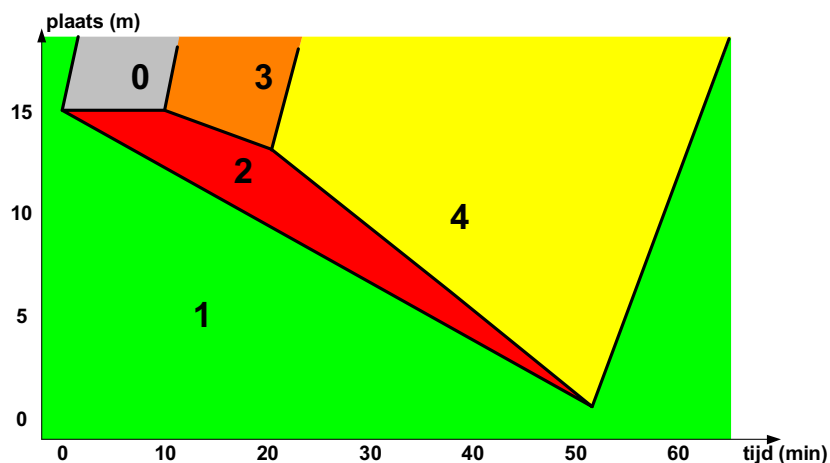
Naast het beschrijven van de relatie tussen de verschillende grootheden biedt het fundamenteel diagram nog een andere mogelijkheid om meer inzicht te krijgen in het verkeersproces. Hiervoor wordt het diagram gebruikt waarin de intensiteit wordt uitgezet tegen de dichtheid. In dit basisdiagram zijn verschillende toestanden aan te wijzen. Deze worden toegelicht aan de hand van het volgende voorbeeld. Voor een weg met twee stroken, met een capaciteit van 2000 voertuigen per uur per rijstrook, en een verkeersvraag van 3000 voertuigen per uur treden een aantal fasen op. De getallen tussen haakjes verwijzen naar de bijbehorende toestand in figuur 4-2.

1. Het verkeer is redelijk druk en rijdt met redelijk een hoge snelheid over de twee stroken (1);
2. Doordat een ongeluk plaatsvindt worden de twee stroken geblokkeerd gedurende 10 minuten, waardoor een file ontstaat (2);
3. Na deze totale blokkade komt één van de stroken vrij en heeft de weg dus een capaciteit van zo'n 2000 voertuigen, de file blijft dus groeien (3);
4. Weer 10 minuten later zijn beide stroken weer vrij voor het overige verkeer en begint de congestie op te lossen (4);
5. Na enige tijd is er niets meer te merken van het ongeluk (1).



figuur 4-2 Fundamenteel diagram met intensiteit uitgezet tegen dichtheid per strook. De stippen geven de verschillende toestanden aan. De lijnen tussen de stippen geven de schokgolven die de grens tussen twee toestanden vormen. Zie ook figuur 4-3.

Zoals ook blijkt uit de fundamentele relatie (4-1) is intensiteit gedeeld door de dichtheid snelheid. Dit maakt het mogelijk om op basis van de toestanden (de getallen in het figuur) in het fundamentele diagram een schatting van de file ontwikkeling in een x-t vlak te geven. Hiertoe worden lijnen tussen de verschillende toestanden uit het voorbeeld getrokken. In figuur 4-2 is dit gedaan voor toestand 1 en 2 en toestand 2 en 3. Door de fundamentele relatie is de helling van deze lijnen een soort snelheid waarmee de overgang tussen beide toestanden zich ontwikkelt in de ruimte-tijd dimensie. Dit geldt voor alle overgangen tussen verschillende toestanden. Zodoende is vrij gemakkelijk de impact van eerder genoemd voorbeeld te bepalen, zie ook figuur 4-3. De grenzen tussen de gebieden liggen immers vast. Deze grenzen noemt men schokgolven.



figuur 4-3 Ruimte-tijd weergave van de file ontwikkeling ten gevolge van het ongeluk en de bijbehorende toestanden.

De file is dus pas na 52 minuten helemaal verdwenen en is bijna 15 km teruggeslagen (stroomopwaarts uitgebreid). Een ander, veel voorkomend voorbeeld is dat congestie ontstaat doordat de vraag groter is dan de capaciteit. Hierdoor zal een file ontstaan welke met een snelheid van $q_{\max} / (k_{\max} - k_c)$ zich stroomopwaarts zal uitbreiden.

Door hetgeen hiervoor is gesteld, lijkt het alsof verkeersontwikkeling via enkele simpele relaties is te beschrijven. Dit is echter niet het geval doordat verkeer zich door een stochastisch karakter moeilijk laat 'samenvatten' in één fundamenteel diagram. Tevens kan het verschillen per locatie of moment van de dag, week of jaar. Zo kan het weer of de samenstelling van de weggebruikers een grote rol hebben. Enige variatie kan worden opgevangen door het variëren van de parameterwaardes. Wanneer in de rest van dit rapport wordt gesproken over het fundamenteel diagram wordt dan ook niet de absolute waarheid bedoeld, maar een benadering van het gemiddelde gedrag van de verkeersstromen. Een andere, belangrijke tekortkoming is het negeren van de capaciteitsval. Dit is een afname van de capaciteit vanaf het moment dat congestie is ontstaan. In subparagraaf 6.3.1 zal dit nader worden besproken aan de hand van een voorbeeld van de testen.

4.2 Harmonisch versus rekenkundige gemiddelde snelheden

De gemiddelde snelheden die het meetsysteem MoniCa (zie paragraaf 2.1) produceert zijn zogenaamde rekenkundige gemiddeldes. Hierbij wordt gedurende een bepaalde periode⁵ (meestal 1, 5 of 15 minuten) de snelheid berekend door alle gemeten snelheden te sommeren en te delen door het aantal metingen.

Voor het gebruik in verkeersmodellen waarbij dichtheid wordt gebruikt als grootte om de toestand te beschrijven is deze berekeningswijze echter niet correct. Daarvoor moeten de gemiddelde snelheden worden berekend door te kijken naar de som van de snelheden van de voertuigen op een bepaald wegvak gedeeld door het aantal voertuigen. Het verschil met het rekenkundig gemiddelde is dat men daarbij de gemiddelde snelheid overschat⁶. Deze metingen zijn echter moeilijk te verkrijgen, men zou immers van alle voertuigen op het wegvak de snelheid moeten weten.

Om dit op te vangen wordt er binnen de verkeerskunde gebruik gemaakt van harmonisch middelen, zie ook (4-3). Hierbij wordt niet de waarde zelf gemiddeld, maar de inverse ervan. Het resultaat is de inverse van de gemiddelde snelheid van de voertuigen die zich in het betreffende wegvak bevinden. In wezen worden de individuele snelheden omgezet naar traagheden, gemiddeld en daarna weer teruggerekend naar een snelheid. In het Engels wordt een dergelijk gemiddelde daarom ook wel "space-mean speed" genoemd. Deze snelheden kunnen gebruikt worden bij verkeersmodellering waarbij (4-1) en (4-2) gebruikt kunnen worden.

$$\frac{1}{v_{gem}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i} \quad (4-3)$$

Helaas is het met het huidige MoniCa-meetnet niet mogelijk om snelheidsgegevens van individuele metingen te verkrijgen. Wanneer met echte data gewerkt wordt is harmonisch middelen dan ook niet mogelijk. Wel zijn er mogelijkheden om het harmonisch gemiddelde te schatten. Aangezien in de deze studie alleen met synthetische data wordt gewerkt, zal dit niet nodig zijn.

Bij het middelen van reistijdmeting treedt dit probleem niet op, omdat deze al een ruimtelijk karakter hebben. Een aandachtspunt bij het gebruik van reistijden is wel dat de verdeling van vertrektijdstoppen niet gelijk is aan de verdeling van aankomsttijdstoppen voor dezelfde groep voertuigen door het verschil in reistijd. Zoals ook in paragraaf 3.3 gesteld, wordt dit buiten beschouwing gelaten.

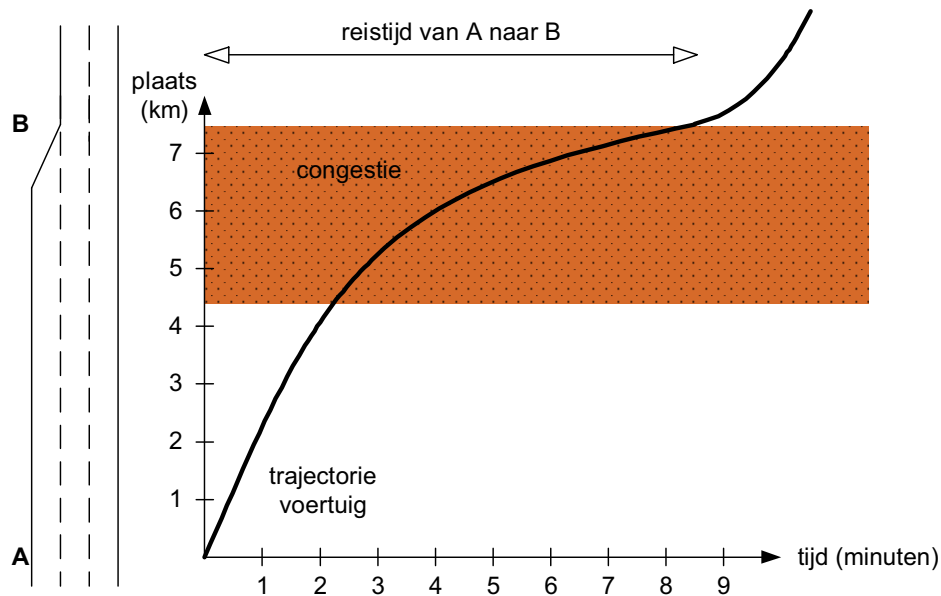
4.3 Trajectoriënmethode: PLSB

Binnen de verkeerskunde staat de term trajectorie voor de grafische weergave van de locatie als functie van de tijd dat een individueel voertuig aflegt. Een trajectorie geeft een goede indicatie van de toestand op een bepaald moment en een bepaalde locatie, doordat de afgeleide naar de tijd de snelheid van het voertuig is, zie figuur 4-4. Zoals in dit voorbeeld is te zien, rijdt het voertuig eerst vrij

⁵ Rekenkundige gemiddelde snelheden worden in het Engels hierdoor "time-mean speeds" genoemd.

⁶ Bij een populatie voertuigen waarvan bijvoorbeeld de helft 120 km/uur rijdt en de andere helft 80 km/u rijdt komen, binnen een bepaalde periode, meer snelle voertuigen langs een meetpunt dan langzame voertuigen wat de gemiddelde snelheid van de populatie opdrijft tot boven de 100 km/u.

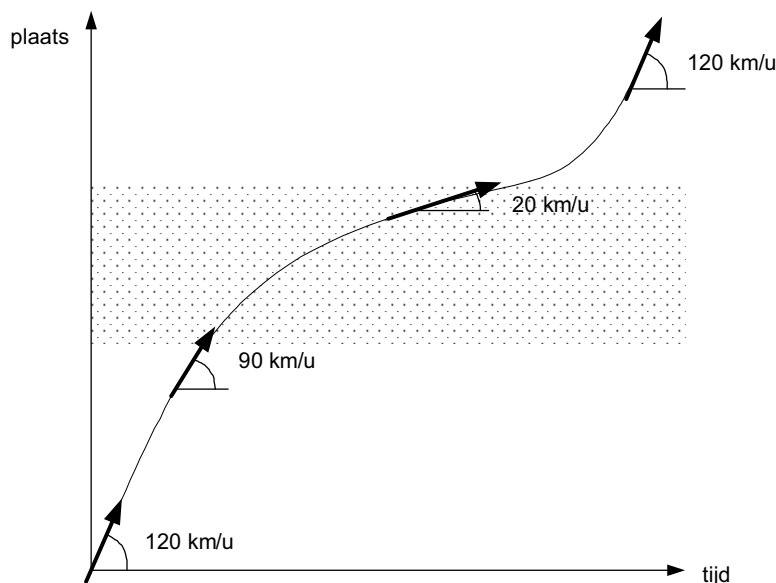
snel en na één minuut trager. Deze vertraging kan komen doordat het voertuig een file in is gereden, in dit geval veroorzaakt door een afname in het aantal stroken. Daarnaast kan uit een trajectorie van een voertuig nauwkeurig de reistijd over een bepaald traject worden bepaald. In figuur 4-4 doet het voertuig er bijvoorbeeld 8,5 minuten over om van A naar B te komen, wat neerkomt op een gemiddelde trajectsnellheid van 53 km/uur.



figuur 4-4 Voorbeeld van een trajectorie van een voertuig dat A passeert met zo'n 120 km/uur. Door een strookvermindering ontstaat congestie en waardoor de gemiddelde snelheid van het voertuig over het traject A-B daalt naar 53 km/uur.

Zoals ook gesteld is in de vorige subparagraaf zijn dergelijke metingen veelal niet beschikbaar en zeker niet van alle voertuigen. Een methode om trajecten af te leiden uit de puntmetingen van MoniCa is een trajectoriënmethode. Hierbij worden de harmonische gemiddelde snelheden gebruikt en als het ware uitgesmeerd over de totale ruimte. Door een pad te volgen waarbij de richting per locatie en tijdstip raakt aan de geldende snelheid ontstaat een trajectorie voor een imaginaire voertuig.

Het uitsmeren van de puntmetingen kan op verschillende manieren. De methode waarvan bij deze studie gebruik gemaakt wordt is de Piece-wise Linear Speed-Based methode. Zoals de naam al zegt, gaat deze trajectoriënmethode er van uit dat de snelheid tussen twee puntmetingen lineair verloopt tussen beide meetwaarden. In figuur 4-5 is een voorbeeld gegeven hoe dit is gedaan voor de situatie zoals deze in het voorgaande voorbeeld is geschetst.



figuur 4-5 Met de PLSB methode wordt een trajectorie opgebouwd op basis van een aantal puntmetingen (pijlen) door het snelheidsverloop (gelijk aan de afgeleide van de trajectorie) geleidelijk te laten verlopen tussen twee meetlocaties.

4.4 Verkeersmodel: Fastlane

Om de verkeersontwikkeling te kunnen simuleren worden verkeersmodellen gebruikt. Deze komen in vele soorten en maten voor. Hoewel er op vele wijze categorisering plaats kan vinden, wordt in deze studie uitgegaan van een dynamisch verkeersmodel voor het simuleren van wegverkeer op netwerken. Uit verkeerskundig oogpunt is een belangrijke verdeling binnen deze groep te maken aan de hand van het niveau waarop deze verkeersstromen worden berekend. In het algemeen worden hierin drie niveaus onderscheiden:

- Microscopische modellen waarbij wordt gerekend per individueel voertuig;
- Mesoscopische modellen die werken met groepen voertuigen of met individuele voertuigen die zich gedragen gebaseerd op macroscopische relaties;
- Macroscopische modellen werken niet met voertuigen of groepjes, maar met grootheden die de verkeersstroom karakteriseren (zoals dichtheid, intensiteit en snelheid).

Het model dat in deze studie veel naar voren zal komen is het macroscopisch verkeersmodel Fastlane, versie 2007-21-02 fase 2. Fastlane is ontwikkeld door Hans van Lint en Serge Hoogendoorn en staat voor: "First-order fAST mulTi-class mACROscopic traffic flow model for simulation of NETwork-wide traffic conditions". Bij macroscopische verkeersmodellen wordt de belangrijkste vergelijking gevormd door die van het behoud van voertuigen:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = instroom - uitstroom \quad (4-4)$$

Hierin is k de dichtheid en q de intensiteit, welke via het fundamenteel diagram (zie subparagraaf 4.1) is gerelateerd aan de dichtheid. Hierdoor ontstaat een eerste orde ("first-order") differentiaal vergelijking die de dynamica van het verkeersproces beschrijft. Het voordeel hiervan is dat het proces relatief inzichtelijk wordt en zich daardoor goed leent voor onderzoeksdoeleinden.

Bij de volledige naam voor Fastlane wordt ook de term "multi-class" gebruikt. Deze duidt aan dat een onbeperkt aantal gebruikersklassen gedefinieerd kunnen worden met elk verschillende eigenschappen. Zo zou bijvoorbeeld onderscheid naar voertuigtype gemaakt kunnen worden (motoren, personenauto's, vrachtverkeer) en/of in het gedrag van de bestuurder (agressief, voorzichtig). Per klasse wordt behoud van voertuigen (4-4) toepast. Ook worden per gebruikersklasse aparte

fundamentele diagrammen (zie subparagraaf 4.1) gebruikt waarin bijvoorbeeld de maximale snelheid bepaald wordt.

Een ander aspect is het capaciteitsbeslag per gebruikersklasse. Vrachtverkeer heeft bijvoorbeeld een lagere maximumsnelheid en neemt relatief veel ruimte in. Dit ruimtebeslag is dynamisch doordat niet alleen de voertuiglengte wordt meegenomen, maar ook een volgtijd. Bij verschillende snelheden verandert daardoor de volgafstand. Waardoor de zogenaamde personenauto-equivalente waardes⁷ van het vrachtverkeer kunnen veranderen tijdens het simuleren. Deze pae-waardes spelen een belangrijke rol bij het bepalen van de totale toestand en in wat voor soort toestand de betreffende cel zich bevindt. Daarvoor worden de dichtheden per klasse vermenigvuldigd met de pae-waardes per klasse en vervolgens gesommeerd. Wanneer deze totale dichtheid hoger is dan de kritische dichtheid heerst er een congestieve situatie, zie ook subparagraaf 4.1.

Het netwerk in Fastlane wordt gedefinieerd door gebruik te maken van knopen en links. Iedere link heeft vaste eigenschappen zoals het aantal stroken, de maximale snelheid, de capaciteit, een lengte en het aantal cellen. Aangezien deze eigenschappen niet kunnen veranderen per link, is bij iedere verandering in het netwerk (bijvoorbeeld een wijziging in het aantal stroken, een aansluiting, etc) een nieuwe link nodig. Om deze links te verbinden worden knopen gebruikt.

De onderverdeling van de links door middel van cellen wordt gedaan om het model dynamisch te laten functioneren op een gedetailleerd niveau. Tijdens het simuleren heeft een cel slechts één enkele toestand (dichtheid) die voor de hele cel geldt. Wanneer de cellengtes te groot (bijvoorbeeld gehele links) gekozen worden is het model dus nauwelijks nog dynamisch. Aan de andere kant is het niet praktisch om de cellen te klein te kiezen omdat de meerwaarde snel afneemt. Daarnaast is het zo dat de lengte van een simulatiestap gebaseerd is op de lengte van een cel en de maximumsnelheid van die cel. Het moet namelijk niet mogelijk zijn dat voertuigen een cel zouden overslaan binnen één simulatiestap. Daarom is in deze studie een minimale cellengte van 250 meter aangehouden.

Ondertussen zijn er vele versies van Fastlane beschikbaar, met als voornaamste onderscheid de methode waarop de resultaten worden berekend. Dit kan op een deterministische wijze plaats vinden waarbij de uitkomst exact wordt berekend en elke keer hetzelfde is wanneer deze wordt herberekend. Daarnaast zijn er ook stochastische versies waarbij die relaties niet volgens één vast verband zijn vastgelegd, maar er een kans component aan toe gevoegd is. Deze laatste soort is realistischer aangezien het gedrag van verkeer per definitie bijna altijd stochastisch is. Immers zijn geen van de gebruikers identiek en zijn de omstandigheden elk moment verschillend. Voor de ontwikkeling en het onderzoek dat in deze studie wordt uitgevoerd is de stochastische versie echter minder goed toepasbaar. Aangezien verschillende alternatieven door middel van simulatie met elkaar vergeleken zullen worden, wordt een deterministische versie gebruikt om verschillen niet te laten veroorzaken door deze stochastische invloed. Tevens wordt hierdoor de inzichtelijkheid verhoogd.

4.5 Filtertechnieken

Hoewel er vele verkeersmodellen zijn en de één de werkelijkheid realistischer benadert dan de ander is het niet mogelijk om alleen op basis hiervan de toestand van een wegvak te "voorspellen". Zo is het vaak van tevoren niet duidelijk hoeveel en wat voor soort verkeer gebruik wil maken van een weg op een bepaald moment. Het verkeer gedraagt zich daarnaast veelal stochastisch en is niet in één enkele relatie te bevatten, zie ook subparagraaf 4.1. Daarom worden metingen gebruikt om de modellen aan te sturen en waar nodig bij te sturen.

Verkeersmodellen (zo ook Fastlane) beschrijven het verkeer meestal aan de hand van de dichtheid. Helaas is dit een grootheid die lastig te meten is en daarom ook niet direct gecorrigeerd kan worden aan de hand van metingen. Intensiteiten en snelheden zijn daarentegen wel goed meetbaar. Om dit te overbruggen worden verschillende filtertechnieken gebruikt. Twee daarvan worden in deze paragraaf kort toegelicht omdat ze later in het rapport vaak terug zullen keren. Het betreft het (extended) Kalman filter en het particle filter.

⁷ Omdat de capaciteit van een weg of rijstrook vaak wordt aangeduid in eenheden van personenauto's per tijdseenheid wordt het capaciteitsgebruik van andere gebruikersklassen in pae's uitgedrukt zodat ze gesommeerd kunnen worden.

4.5.1 (Extended) Kalman Filter

Het Kalman filter maakt gebruik van de verkeersstoestand op het vorige tijdstip, een verkeersmodel en de metingen van het huidige tijdstip. Met deze twee gegevens wordt de toestand geschat voor het huidige tijdstip. Het is daardoor een recursieve schattingsmethode met als voordeel dat het relatief snel is omdat geen grote databases met oude metingen en voorspellingen nodig zijn.

Per simulatiestap worden bij het uitvoeren van het KF twee fases onderscheiden. Ten eerste is er de voorspellingsfase. Op basis van de voorgaande toestand wordt een voorspelling gemaakt met het model voor de toestand een simulatiestap later (x^{model}). Hiervoor wordt het verkeersmodel gebruikt en bevat de zogenaamde procesvergelijking. Deze toestand is dus uitgedrukt in dichtheid.

Ten tweede is er de correctiefase aan de hand van metingen (in het geval van MoniCa-gegevens: intensiteit en snelheid). Deze geven een indicatie voor de toestand. Zoals in subparagraaf 4.1 is getoond hebben deze grootheden een relatie met de dichtheid via het fundamentele diagram. Binnen het KF wordt deze relatie de meetvergelijking genoemd. De voorspelling voor de dichtheid door het model kan dus worden vertaald naar meetbare grootheden. Deze kunnen vervolgens worden vergeleken met de metingen en een verschil (Δy) tussen beide bronnen bepaald worden. Aan de hand van een correctiefactor (K ; de Kalman Gain) wordt de afweging gemaakt in hoeverre de modelvoorspelling wordt aangevuld met dit verschil (4-5).

$$x = x^{\text{model}} + K \cdot \Delta y \quad (4-5)$$

Bij het bepalen van de Kalman Gain (4-6) worden een drietal aspecten meegewogen. Twee van deze aspecten zijn de mate van (on)betrouwbaarheid van beide bronnen. Om twee bronnen te combineren met een verschillende voorspelling is het namelijk nodig er van uit te gaan dat beide ruis bevatten. Kenmerkend voor het KF is dat het uitgaat van de normale verdeling van deze ruis fout die hoort bij de procesvergelijking (model) en de meetvergelijking (metingen). Daarom wordt door de gebruiker per bron de variantie opgegeven.

Een derde aspect is de gevoeligheid van de meetvergelijking voor de toestand. De redenatie hier achter is dat een aanpassing van de modelvoorspelling afhangt van de mate waarin een verschil in de toestand leidt tot een verandering van de meetbare grootheid. Een gevoelige meetvergelijking betekent dat een kleine toestandsverandering een groot verschil in de meetbare grootheid veroorzaakt. Een kleine "foutje" in het model kan dus een grote impact hebben en daarom moet een relatief grote aanpassing plaatsvinden richting de metingen.

$$K = \frac{\frac{df^{\text{meet}}}{dk} \cdot \text{var}^{\text{proces}}}{\text{var}^{\text{meet}}} \quad (4-6)$$

Een voorwaarde voor het gebruik, naast de normale verdelingen van de fouten, is dat de vergelijkingen lineaire relaties zijn. Vaak is dit echter niet het geval en zijn de proces- en of meetvergelijking niet-lineair. Om toch de aanpak van een KF te gebruiken biedt het extended Kalman filter een oplossing. Bij een EKF worden de vergelijkingen lokaal (rondom de toestand) afgeleid zodat lineaire relaties gebruikt kunnen worden. Zo kan alsnog een KF aanpak worden toegepast.

De bovenstaande omschrijving is gebaseerd op het schatten van de toestand waarbij de toestand wordt gevormd door de dichtheid. Het is echter ook mogelijk om bijvoorbeeld parameters te schatten door deze te zien als de te schatten toestand. Een ander voordeel van de KF aanpak is dat het een indicatie geeft van de betrouwbaarheid via de covariantiematrix. Omwille van compactheid van deze paragraaf is de uitleg hiervan achterwege gelaten en zal toegelicht worden wanneer blijkt dat dit nodig is voor een betreffend onderdeel.

4.5.2 Particle filter

Een alternatief voor EKF zijn zogenaamde "particle filters". Deze hebben als groot voordeel dat het niet nodig is om te veronderstellen dat de foutverdeling behorende bij de proces- en of meetvergelijking normaal verdeeld is. Ook hoeven de relaties niet lineair te zijn. Voor het toepassen

van de KF aanpak zijn hiervoor aanpassingen mogelijk, maar deze verminderen de kwaliteit van uitkomst. Wanneer het PF uitgebreid genoeg is kan deze betere resultaten geven in deze gevallen.

Bij een PF wordt een veelvoud van schattingen uitgevoerd welke leiden tot één gecombineerde toestandschatting. Dit in tegenstelling tot het KF waar per simulatiestap slechts één schatting en één aanpassing op de metingen plaatsvindt. Op basis van de procesvergelijking met ruis wordt, gegeven de toestanden in de vorige simulatiestap, een nieuwe set toestanden bepaald. Per geschatte toestand (particle) wordt een weefactor bepaald die aangeeft in welke mate de toestand reëel is gezien de metingen. Bij het bepalen van de toestand worden de particles gecombineerd tot één schatting.

4.6 Datafusie

Zoals de term datafusie al zegt, worden hierbij meerdere gegevens samengevoegd. Dit kan van belang zijn nu er in het kader van het NDW (zie paragraaf 2.3) steeds meer soorten gegevens beschikbaar komen. Aangezien de aard van de gegevens sterk kan verschillen is het niet mogelijk om de verschillende metingen zomaar te aggregeren. Zo kan men bijvoorbeeld reistijden van een traject in minuten hebben uit de ene bron, en snelheden in kilometers per uur op verschillende locaties uit de andere databron. Het is niet mogelijk om deze te middelen en als gezamenlijke invoer te gebruiken voor een verkeersmodel en/of filter (zie voorgaande paragrafen).

Ondanks dat het geen voor de hand liggende aanpak vereist, is het zonde om de gegevens van de ene bron te negeren. Om dit op te vangen zijn/worden verschillende methoden ontwikkeld om met verschillende type data om te gaan. Dit moet leiden tot één enkele toestand schatting die gebaseerd is op de gecombineerde informatie uit alle databronnen.

Datafusie kan plaatsvinden op verschillende niveaus. Zo kunnen de metingen gefuseerd worden en vervolgens gezamenlijk als input voor een model of filter worden gebruikt. Tegenover dit "lage" niveau staat het toepassen van datafusie op het netwerkniveau [10]. Ongeacht het niveau van fuseren zijn er verscheidene argumenten om datafusie toe te passen. Zo leidt datafusie leidt tot [9, 17]:

- Betrouwbaardere informatie. Meerdere sensoren kunnen immers een bepaalde toestand bevestigen;
- Verhoogde nauwkeurigheid. Inconsistente informatie door meetfouten kan worden omgezet in consistente informatie en kleinere fouten;
- Verminderde ambiguïteit. Gegevens uit meerdere sensoren verminderen het aantal plausibele hypothesen;
- Een robuuster monitoringsysteem. Het falen van een sensor leidt niet tot het falen van het gehele systeem;
- Een grotere ruimtelijke en temporele dekkingsgraad. Het ene type sensor is wellicht beter dan het andere bij toepassing op een bepaalde plaats en tijd en onder bepaalde omstandigheden;
- Verhoogde kostenefficiëntie. Een combinatie van verschillende sensoren van gemiddelde kwaliteit (nauwkeurigheid, betrouwbaarheid) kunnen dezelfde performance halen als een set identieke kwalitatief betere (maar duurdere) sensoren. Ook zijn door slim te combineren in totaal wellicht minder sensoren nodig.

5 Methoden voor filteren en assimileren data

In dit hoofdstuk worden drie methoden besproken waarmee de geschetste problematiek, zie voorgaande hoofdstukken, mogelijk opgelost kan worden. Het gaat hierbij met name om het verwerken van de reistijdmetingen. De metingen uit detectielussen worden momenteel ook al gebruikt voor real-time toestandschattingen. Maar de gebruikte methoden maken het toepassen van de reistijdmetingen onmogelijk. Een tweede aspect waar de methoden een oplossing voor moeten bieden is het assimileren van beide databronnen. Bij de beschrijving van de werking van de methoden wordt de term "assimileren" gebruikt in plaats van de algemene "datafusie" omdat bij alle methoden de metingen niet worden samengevoegd, maar gelijk worden gesteld.

Voor de verwerking van reistijdmetingen is een belangrijk aandachtspunt de mate waarin een databasestructuur gebruikt wordt. Aangezien de reistijdgegevens betrekking hebben op (verschillende) toestanden in het verleden tot het moment van meten, is het op het eerste gezicht logisch dat een historische database gebruikt zou moeten worden. In grote lijnen kan gezegd worden dat de nauwkeurigheid van deze database de betrouwbaarheid van de schatting positief beïnvloedt. Afhankelijk van de methode leidt dit waarschijnlijk tot een langere verwerkingstijd.

Daarnaast speelt bij de problematiek de assimilatie van beide databronnen een belangrijke rol. Naast een verschillende betrouwbaarheid spelen ook de verschillende dimensies een rol. Hiermee wordt bedoeld dat de reistijden betrekking hebben op een traject en de metingen uit de detectielussen voortvloeien uit punten. Tevens is de tijd waarop de metingen betrekking hebben anders. Reistijden komen, net als de detectielussen van het MoniCa-meetnet iedere minuut, beschikbaar, maar ze geven vaak informatie over een langere periode (met de tijdsduur van de waarde van de meting).

Per aspect zijn verschillende benaderingen mogelijk. De methoden in dit hoofdstuk worden slechts in grote lijn behandeld en richten zich vooral op de gedachtegang. Op basis van de bestudeerde literatuur [9, 10, 14, 15, 16 en 17] zijn een drietal methoden ontwikkeld. De eerste paragraaf beschrijft een methode waarbij de methode vooral gebaseerd is op het minimaliseren van de behoefte van een database (1^e aspect) door een instantane Kalman filter benadering. In de tweede en derde paragraaf nemen de methoden toe in de mate waarin een database(structuur) vereist is. Ook de wijze waarop de assimilatie is opgelost en op welk niveau deze plaatsvindt verschilt. Tot slot wordt in paragraaf 5.4 een afweging gemaakt welke methode in het volgende hoofdstuk zal worden uitgewerkt en gespecificeerd.

5.1 Instantane trajectoriën met Kalman filter

Huidige toestandschattingen op basis van enkele metingen uit detectielussen maken gebruik van recursieve modellen waarbij geen database van oude metingen vereist is (Kalman filters, zie ook subparagraaf 4.5.1). Dit heeft als groot voordeel dat deze methoden snel zijn. Deze benadering is niet één-op-één toe te passen met reistijdmetingen. Voor het gebruik van de reistijdgegevens in een real-time toestandschatting is het bijna vanzelfsprekend dat een schattingachtige methode gebruikt wordt. Dit om de (oude) data uit reistijdmetingen over een bepaald traject te relateren aan het huidige moment. Dit lijkt te botsen met het grootste voordeel van een Kalman filter, omdat bij het maken van een schatting een databasestructuur nodig is met gegevens van verschillende momenten en locaties.

In deze paragraaf wordt een methode besproken om toch de reistijdmetingen te kunnen verwerken zonder het gebruik van een database. Zo kan een Kalman filter worden gebruikt en blijft de verwerkingstijd beperkt.

De basis om een (historische) database te voorkomen is de huidige wijze om online reistijden te schatten. Aan de hand van de snelheidsmetingen uit de detectoren worden momentane reistijden bepaald die gelden bij de condities van dat moment. In tegenstelling tot het gebruik voor offline reistijdschattingen wordt uitgegaan van een stationair toestand. Dit houdt in dat de reistijden voldoen door te veronderstellen dat de toestand gelijk is en blijft voor de komende tijd (begrensd door de maximale reistijd, want daarna doet het er niet meer toe). De momentane reistijd is dan een sommatie van reistijden per segment, op basis van de snelheden uit de dubbele detectielussen in de weg. Door de momentane reistijd te vergelijken met de gemeten reistijd kan een correctieslag

plaatsvinden. Het enige verschil is dat in dit geval niet worden verondersteld dat de situatie in de toekomst stationair is, maar dat de situatie gedurende de reistijdmeting stationair is geweest.

De eerste stap zou zijn om de metingen uit de detectielussen via een conventioneel Kalman filter te combineren met de modelvoorspellingen. Zodoende ontstaat een toestandschatting voor het netwerk. En dus zijn ook snelheden en intensiteiten voor het traject per cel beschikbaar. Op basis hiervan worden de momentane reistijden bepaald.

Hiervoor kunnen systemen gebruikt worden die al toegepast en uitvoerig geëvalueerd zijn. MoniBas berekent reistijden op basis van puntwaardes (de snelheden per cel) van zowel intensiteiten als snelheden en is zeer geschikt [14] voor deze toepassing. Een eenvoudiger alternatief is de PLSB methode waarbij alleen snelheden worden gebruikt.

Door de momentane reistijden te delen door de gemeten reistijden is de factor van de mate waarin de schatting afwijkt van de meting te bepalen. Deze factor wordt vervolgens gebruikt om de momentane reistijden per cel te schalen. Op basis van deze reistijden per cel wordt snelheid (volgens de meting) bepaald. Zo blijft ook de variatie van de snelheden per cel van het traject gewaarborgd. Dit in tegenstelling tot wanneer de reistijdmeting gebruikt zou worden om een gemiddelde snelheid over alle cellen te berekenen. Op deze wijze zouden de karakteristieke snelheidsverschillen worden afgevlakt. Dat is een onwenselijke situatie bij verkeersmodellering, zeker wanneer congestie op- of afbouwt.

Dit is in wezen een sequentiële filtermethode: eerst toestandschatting op basis van gegevens uit detectoren en daarna een aanpassing op basis van de reistijdmetingen. Door de correctieslag met reistijden niet alleen te baseren op de detectormetingen, maar ook het verkeersmodel te gebruiken werkt het ook bij weinig detectoren. Mogelijk is het resultaat wel minder goed wanneer weinig metingen uit detectoren beschikbaar zijn. Aan de andere kant is het helemaal niet mogelijk om (goede) reistijden te construeren wanneer er erg weinig detectoren zijn. Zo zou het kunnen zijn dat slechts een enkele of helemaal geen detectoren binnen het traject liggen. De afweging om het verkeersmodel wel of niet te gebruiken om de reistijden te construeren, zal bij een eventuele uitwerking bestudeerd moeten worden.

Ook de assimilatie vindt opeenvolgend plaats. Belangrijk hierbij zijn wel de mate waarin, bij beide filterstappen, de toestandschatting wordt aangepast aan de waardes uit metingen. Zoals bij conventionele (extended) Kalman filter zal dit gespecificeerd worden door gebruik te maken van een afzonderlijke covariantiematrix per databron. Door de momentane reistijdschattingen kan, ondanks de verschillende aard van de databronnen, assimilatie plaatsvinden.

Intuïtief zou men zeggen dat alleen snelheden aangepast kunnen worden aangezien reistijdmetingen alleen een directe relatie hebben met snelheden. Wanneer voor de reistijdschattingen de PLSB methode gebruikt wordt is dit het geval en vindt in wezen alleen assimilatie van snelheden en reistijden plaats. Terwijl bij gebruik van MoniBas daarnaast ook assimilatie met intensiteiten⁸ mogelijk is.

Naast het aanpassen van de toestand is het mogelijk om de parameters aan te passen. Vaak zijn het parameters die het fundamenteel diagram specificeren. Zoals ook in paragraaf 4.1 uitgelegd is, wordt het FD gebruikt om de gemeten variabelen en de toestandsvariabelen aan elkaar te relateren. Meestal worden in verkeersmodellen hiervoor de snelheid bij vrije afwikkeling, de kritische snelheid, de kritische dichtheid⁹ en de stremmingsdichtheid gebruikt. Maar ook bijvoorbeeld het aandeel per gebruikersklasse.

Uit onderzoek [16] blijkt dat het nuttig kan zijn om een beperkt aantal parameters te schatten aangezien de geschatte toestand dan eerder de werkelijkheid benadert en eventuele veranderingen opspoort. Het probleem hierbij is echter om de juiste parameters te kiezen die aangepast dienen te worden. Zo zou bij het verlagen van de maximale snelheid het gepast zijn om de snelheid bij vrije afwikkeling aan te passen, terwijl het aandeel per gebruikersklasse aangepast zou kunnen worden

⁸ Dit wil niet zeggen dat uit de reistijdmetingen direct intensiteiten afgeleid kunnen worden, maar de intensiteiten die het model voorspelt (gecorrigeerd door de metingen uit de detectielussen) worden gebruikt voor de reistijdschatting. En zo kunnen ze gecorrigeerd worden aan de hand van de reistijdmetingen.

⁹ De kritische dichtheid is de dichtheid die correspondeert met de kritische snelheid.

wanneer er meer of minder vrachtverkeer is. Om hiervan gebruik te maken is het echter nodig om een idee te hebben welke verandering optreedt.

5.2 Historische trajectoriën met Kalman filter

Een essentiële en bepalende aanname bij de methode zoals gepresenteerd in paragraaf 5.1 is de mate waarin stationariteit geldt. De methode is eigenlijk alleen geldig wanneer er gedurende de periode van de reistijdmeting niets in het verkeersbeeld verandert. Dit is vaak niet het geval en daardoor zal de instantane methode waarschijnlijk slecht presteren bij wisselende omstandigheden, bijvoorbeeld open afbouwende congestie. Gezien de aard van de reistijdmetingen is het uit verkeerskundig oogpunt netter om de situatie waar de meting betrekking op heeft, mee te nemen. Dit is dus een wezenlijk verschil met de instantane methode waar de berekening gebaseerd is op een momentopname. Een nadeel van deze reëlere aanpak is dat, zoals in de inleiding ook al gesteld is, wel een databasestructuur met (gecorrigeerde) oude metingen en modelvoorspellingen vereist is. In de volgende alinea's wordt een voorstel gedaan hoe dit te combineren is met een Kalman filter.

Voor iedere reistijdmeting die beschikbaar komt, is het moment van vertrekken bekend. Aangezien de MoniCa-metingen van het vertrektijdstip tot aan het moment van meten beschikbaar zijn, kan de reistijd worden geschat. De nauwkeurigheid hiervan hangt samen met de beschikbaarheid en de locaties van de detectoren. In wezen is het dus het offline reistijdschatten voor korte termijn voorafgaand aan de reistijdmeting. Zodoende kan gebruik gemaakt worden van bestaande methoden voor het offline reconstrueren van reistijden. De PLSB methode geeft goede resultaten [14] bij het achteraf schatten van reistijden gegeven een bepaald vertrekmoment.

Het kan zo zijn dat de schatting van de korte termijn offline aanpak een langere reistijd schat dan beschikbaar is aan metingen (de geschatte reistijd is langer dan de gemeten reistijd). De reistijd wordt dus overschat door het algoritme, oftewel onderschatting van de snelheden. In dergelijke gevallen ontbreekt data die nodig is voor de offline-achtige schatting. Om dit op te vangen wordt na het moment van meten een stationaire toestand verondersteld. Zo is de reistijdschatting te maken met de PLSB methode¹⁰. De PLSB-reistijd worden geschaald op basis van de reistijdmetingen. Deze correctie beïnvloedt ook de waardes voor snelheden waar de PLSB-reistijd op gebaseerd is. Net als bij de methode uit de vorige paragraaf geven deze trajectoriën een indicatie van het dynamische proces en de verhouding van de reistijden per cel. Bij een eventuele uitwerking moet blijken of alleen het gebruik van de detectoren om de reistijdschatting te maken voldoende is.

Door het bovenstaande proces te herhalen voor iedere reistijdmeting wordt een verzameling trajectorien opgebouwd. Eventueel kunnen hierin ook al niet-gerealiseerde reistijden worden verwerkt, maar dat wordt voorlopig buiten beschouwing gelaten. Per tijdstip worden waarschijnlijk de meeste detectorlocaties gebruikt door een trajectorie¹¹, zie ook figuur 4-5. Voor de betreffende cellen/links is een snelheidsverloop af te leiden. Hiermee kan vervolgens voor het betreffende vertrektijdstip de toestand worden geschat.

Aangezien dit vertrektijdstip niet gelijk is aan het moment van meten en daarom de toestandschatting niet interessant is voor het gebruik in een real-time verkeersmodel lijkt dit zinloos. Maar hier zou gebruik gemaakt kunnen worden van een verkeersmodel om de oude toestanden te relateren aan de huidige toestand. Het verkeersmodel kan op basis van de (dubbel) gecorrigeerde waardes de toestand schatten voor het moment van meten. Niet alleen de toestand van de verschillende cellen kan worden aangepast. Kalman filters bieden namelijk ook de mogelijkheid om de parameters die gebruikt worden bij de berekening van de toestand te schatten, zie ook paragraaf 5.1. De aangepaste parameterwaardes zouden gebruikt kunnen worden bij het schatten van de huidige toestand op basis van metingen uit MoniCa voor het moment van meten. Dit zijn echter keuzes die bij verdere uitwerking van deze methode gemaakt moeten worden.

¹⁰ Een alternatieve methode is de methode in MoniBas die ook gebruik maakt van intensiteiten. Hierdoor scoort deze methode wel beter voor offline reistijdschatten [14], maar wordt de implementatie en databasestructuur ook complexer.

¹¹ Eventueel niet wanneer twee opeenvolgende trajectoriën veel van elkaar afwijken, maar dit hangt ook van het aggregatieniveau van de meetdata af.

Door deze aanpak is het in wezen ook een sequentiële aanpak van filteren: eerst wordt de ene databron (detectielussen) gebruikt om de PSLB-trajectoriën te bepalen en daarna de andere databron (reistijdmetingen) ter correctie van de eerste databron. Dit houdt in dat de assimilatie niet alleen opeenvolgend plaatsvindt, maar ook op het niveau van de metingen wordt uitgevoerd zodat één gezamenlijk invoerwaarde voor het model ontstaat.

Een variabele is de mate waarin op de metingen wordt vertrouwd. Om de grootte van de database te beperken kan volledig op de metingen vertrouwd worden. De keerzijde hiervan is dat de modelvoorspelling volledig wordt gecorrigeerd op basis van de metingen. De verkeerskundige kennis die is vertaald in het verkeersmodel wordt hierbij in wezen genegeerd als databron. En ook bij ontbrekende of verkeerde metingen kan dit een negatieve uitwerking hebben.

5.3 Parameterschatting op basis van een deeltjesfilter

In de paragrafen hiervoor is beschreven hoe het filteren en de assimilatie opeenvolgend kan plaatsvinden. Door deze sequentiële aanpak worden de (model)voorspellingen eerst bijgesteld door de ene databron en vervolgens door de andere databron. Tevens hebben beide methoden de overeenkomst dat het assimileren plaatsvindt op het niveau van meten: beide databronnen worden gecombineerd en vervolgens als één invoer in het model verwerkt. Een andere aanpak is om beide databronnen simultaan in te zetten om de uitkomsten van de modelvergelijking te beïnvloeden. Een toepassing van deze laatste benadering voor toestandschatting op basis van gegevens uit dubbele detectielussen en reistijdmetingen zal in deze paragraaf worden toegelicht. In tegenstelling tot de methoden in paragraaf 5.1 en 5.2 wordt geen gebruik gemaakt van een Kalman filter, maar van een aanpak geïnspireerd door particle filteren. Zoals zal blijken wordt de toestand zelf niet geschat, maar de worden de parameters geschat. De toestand wordt hier vervolgens van afgeleid, daarom wordt voor in deze paragraaf ook niet gesproken over "toestandschatting", maar "toestandbepaling".

Zoals ook in subparagraaf 4.5.2 te zien is, komt het bij particle filteren er op neer dat meerdere modelvoorspellingen worden gegaan die beoordeeld en gecombineerd worden. De verschillende modelvoorspellingen kunnen worden gegenereerd door, uitgaande van een gelijke beginsituatie, verschillende waarden voor parameters te gebruiken. De beoordeling van de deeltjes vindt plaats door te kijken welk van deze voorspellingen het best overeenkomt met de metingen. Zo kan de beste keuze van de parameterwaarden worden bepaald. Deze (aangepaste) parameterwaarden kunnen gebruikt worden voor nieuwe modelvoorspellingen. Tevens kan de toestand bepaald worden door te kijken naar de best scorende deeltjes. De nauwkeurigheid van deze methode hangt voor een groot deel af van de keuze van welke parameters geschat worden en het aantal deeltjes. Een toenemend aantal deeltjes, eventueel voor verschillende parametercombinaties, zorgt hoogstwaarschijnlijk voor een betere toestand. Maar dit zal ten koste gaan van de verwerkingsnelheid.

Uitgangspunt is dat na het verstrijken van één minuut¹² metingen beschikbaar komen. Op basis van de reistijdmeting wordt het vertrekmoment bepaald. Uitgaande van de toestand voorafgaand aan dit moment worden verschillende schattingen van de verkeersontwikkeling tot aan het moment van meten gemaakt. Deze zogenaamde deeltjes verschillen van elkaar doordat ze allemaal worden gegenereerd met verschillende (combinaties van) parameterwaarden. De parameters (bijvoorbeeld van het fundamenteel diagram) spelen een belangrijke rol bij de modellering van het verkeer, maar zijn vaak niet exact bekend en kunnen verschillen per moment en/of locatie.

Tijdens het doorrekenen van elk van de deeltjes zullen de detectielusmetingen worden nagebootst. Ook zal een reistijd voor het betreffende reistijdtraject worden nagebootst via de al eerder besproken PLSB-methode, zie ook subparagraaf 4.3. Door deze nagebootste metingen te vergelijken met de werkelijke metingen kan beoordeeld worden welk deeltje het best de werkelijkheid benadert. Op basis hiervan kan de toestand voor het moment van meten worden bepaald.

¹² Voor deze studie is uitgegaan van een meetinterval van één minuut omdat dit ook het kleinste interval is voor metingen uit het MoniCa meetnet.

In tegenstelling tot de twee eerder beschreven methoden is het filteren aan de hand van de ene databron onafhankelijk van het filteren met de andere databron. De deeltjes worden simultaan voor alle databronnen gefilterd. De assimilatie vindt bij deze methode dus niet, zoals bij de eerste twee paragrafen, voorafgaand aan de schatting plaats. Na het creëren van de deeltjes wordt de score per databron samengevat in één weegfactor. Vervolgens worden de weegfactoren gecombineerd tot één weegfactor. Op deze wijze is het makkelijk om de weging per databron gemakkelijk te veranderen of zelfs afzonderlijk te gebruiken zodat de verschillende bronnen vergeleken kunnen worden.

Bij de voorgaande twee methoden was het schatten van parameters een optie. Bij dit filter is het echter van essentieel belang voor correct functioneren. De parameters worden bij de volgende set deeltjes (voor de volgende meting) gebruikt om nieuwe combinaties van parameterwaardes te maken die zorgen voor het onderscheid tussen de deeltjes.

In tegenstelling tot de *Historische trajectoriën met Kalman filter* uit de vorige paragraaf worden de reistijden niet gebaseerd op metingen, maar op de modelvoorspellingen. Zo kunnen de reistijden te allen tijden gegeneerd worden en zijn ze onafhankelijk van andere databronnen.

Een keerzijde van deze uitgebreide en generieke methode is dat een uitgebreidere databasestructuur nodig is. Wellicht is de schatting minder nauwkeurig is bij lange verwerkingstijden. Dit hangt erg af van het aantal deeltjes dat nodig is om een goede schatting te kunnen maken. En het vermogen van het algoritme om zich aan te passen op wijzigende situaties. Bij een eventuele uitwerking zal hier rekening mee gehouden moeten worden. Een ander nadeel is de langere rekentijd omdat vele deeltjes (verkeersontwikkelingen) doorgerekend moeten worden.

5.4 Welke methode uitwerken en implementeren?

De methoden zoals besproken in de voorgaande paragrafen verschillen veel in aanpak. Ook zijn ze nog niet uitgewerkt en zijn, voor de ene methode meer dan voor de ander, nog vele variaties mogelijk. Het is echter niet haalbaar om alle methoden uit te werken, te implementeren en te testen. Daarom zal in deze paragraaf een methode geselecteerd worden dat verder zal worden uitgewerkt in hoofdstuk 6 om het te kunnen implementeren en testen. Hierbij zal ook gelet worden op de mate waarin het generiek is en de bewerkbaarheid. Dit omdat het uiteindelijke doel van dit onderzoek niet alleen het maken van een betere schatting is. Maar ook het onderzoeken bij welke omstandigheden dit is, bijvoorbeeld de optimale afstand tussen twee cameralocaties.

De punten waarop gelet wordt zijn:

1. Wat is de invloed van weinig MoniCa-meetpunten?
2. In welke mate is een databasestructuur met nadeel een lange verwerkingstijd?
3. Gevoeligheid voor (foutieve) parameterwaardes, aannames over foutverdelingen van de databronnen etc.
4. De eenvoud van implementatie en inzichtelijkheid van de methode.
5. De mate waarin de methode uitgebreid kan worden met andere databronnen.
6. Hoe adaptief is de methode voor wisselende omstandigheden (congestie, weersinvloeden)?
7. De gevoeligheid voor foute metingen.

Hoe de verschillende methoden scoren van voor elk punt is opgenomen in tabel 5-1. In bijlage 2 is de evaluatie en toelichting op enkele punten te vinden. Uitgaande van deze scores is de derde methode waarschijnlijk de meest belovende methode om te gebruiken bij de ontwikkeling van een methode om reistijdmetingen en metingen uit (dubbele) detectielussen te assimileren ten behoeve van real-time toestandschatten¹³. Vooral de mogelijkheid om verschillende databronnen apart van elkaar te gebruiken en te kunnen vergelijken is een groot voordeel bij het ontwikkelen en beoordelen van de methode. Zo kan de werkelijke bijdrage van de reistijdmetingen ten opzichte van alleen detectielussen worden bepaald. Aangezien het om een eerste verkenning en de ontwikkeling van een methode gaat, wordt het nadeel van de benodigde databasestructuur als ondergeschikt beschouwd. Al is het wel een aspect waar aandacht aan besteed moet worden om de verwerkingstijd te minimaliseren.

¹³ Voor de eenvoud wordt hier gesproken over toestandschatten en niet over toestandschatten voor de eerste twee methoden en toestandsbepaling voor de derde methode.

tabel 5-1 Score per methode voor verschillende punten: slecht (-), matig (o) of goed (+).

	Instantaan trajectorien met Kalman filter	Historische trajectorien met Kalman filter	Parameter- schatting obv deeltjesfilter
Afhankelijkheid van MoniCa-meetpunten	o	-	+
Databasestructuur nodig	+	o	-
Gevoeligheid parameterwaardes, aannames	o	o	+
Eenvoud en inzichtelijkheid	+	-	o
Uitbreidbaarheid met andere bronnen	-	-	+
Adaptief vermogen wisselende omstandigheden	-	o	o
Gevoeligheid foute metingen	-	o	o

In de volgende subparagrafen zal uitvoerig worden uitgelegd hoe de aangepaste benadering van PF is toegepast voor het simultaan assimileren van reistijdmetingen en detectielusgegevens. Aangezien dit hoofdstuk in het kader van de ontwikkeling van filtertechnieken staat zal vooral worden stilgestaan bij de argumentatie van de gemaakte keuzes.

6 Uitwerking en implementatie methode

In dit hoofdstuk zal nader worden ingegaan op de geselecteerde methode uit hoofdstuk 6. Aangezien het vorige hoofdstuk slechts de grote denklijnen van de methoden beschrijft, is deze in dit hoofdstuk (theoretisch) uitontwikkeld. Vervolgens is het filter geïmplementeerd in Matlab en daarna aangepast naar aanleiding van enkele testen. Naast de gespecificeerde beschrijving van het filter zullen in dit hoofdstuk daarom de keuzes voor de uiteindelijke aanpak beargumenteerd worden.

Daartoe wordt in de eerste paragraaf een algemene opzet van het model gegeven. Dit dient om een overzicht van de methode te geven en de verschillende stappen aan te geven. Op basis van deze stappen zal in de paragrafen daarna de gespecificeerde toelichting van het filter worden gegeven.

Zoals hiervoor ook is gemeld, zullen sommige keuzes worden beargumenteerd aan de hand van testen. In eerste instantie zal dit gebeuren aan de hand van een simpel testnetwerk, zie subparagraaf 6.11.1. Maar soms bleek het ook nodig om het filter aan te passen naar aanleiding van problemen die naar voren zijn gekomen bij het testen voor de casestudie: de A13. Voor een uitgebreide omschrijving van dit netwerk wordt verwezen naar paragraaf 7.1. Bij gebruik van deze voorbeelden zal in dit hoofdstuk worden volstaan met een korte beschrijving aangaande de oorzaak en de gevolgen voor het filter.

Tot slot zullen in de laatste twee paragraaf de resultaten en conclusies van verschillende verificatietesten worden beschreven. De eerste paragraaf wordt gedaan met een simpel netwerk en synthetische data die gegenereerd is met Fastlane. Het doel hiervan is om te verifiëren of het filter doet wat de bedoeling is. In paragraaf 6.12 zal worden ingegaan op aspecten die aan het licht kwamen bij het gebruik van een complexer netwerk (de casestudie) en synthetische data die met een ander verkeersmodel gegenereerd zijn. Dit leidt tot een aantal beperkingen die tot een aangepaste testopzet in de twee hoofdstukken daarna heeft geleid.

6.1 Opzet: raamwerk en kern

Uit de drie methoden van het vorige hoofdstuk is de simultane PF-achtige aanpak als meest belovend naar voren gekomen. De beschrijving van de methode is echter erg oppervlakkig en behoeft enige toelichting alvorens deze geïmplementeerd kan worden.

Wanneer de methode uit het vorige hoofdstuk wordt uitgewerkt, is het duidelijk dat het in wezen bestaat uit twee onderdelen. Zo is er een raamwerk en een kern. In het kort gezegd bepaalt het raamwerk welke deeltjes gemaakt moeten worden met welke eigenschappen, welke input wordt gebruikt en wat er met de resultaten per deeltje wordt gedaan. De kern is in wezen het verkeersmodel dat de voor de verschillende deeltjes de verkeersontwikkeling berekent.

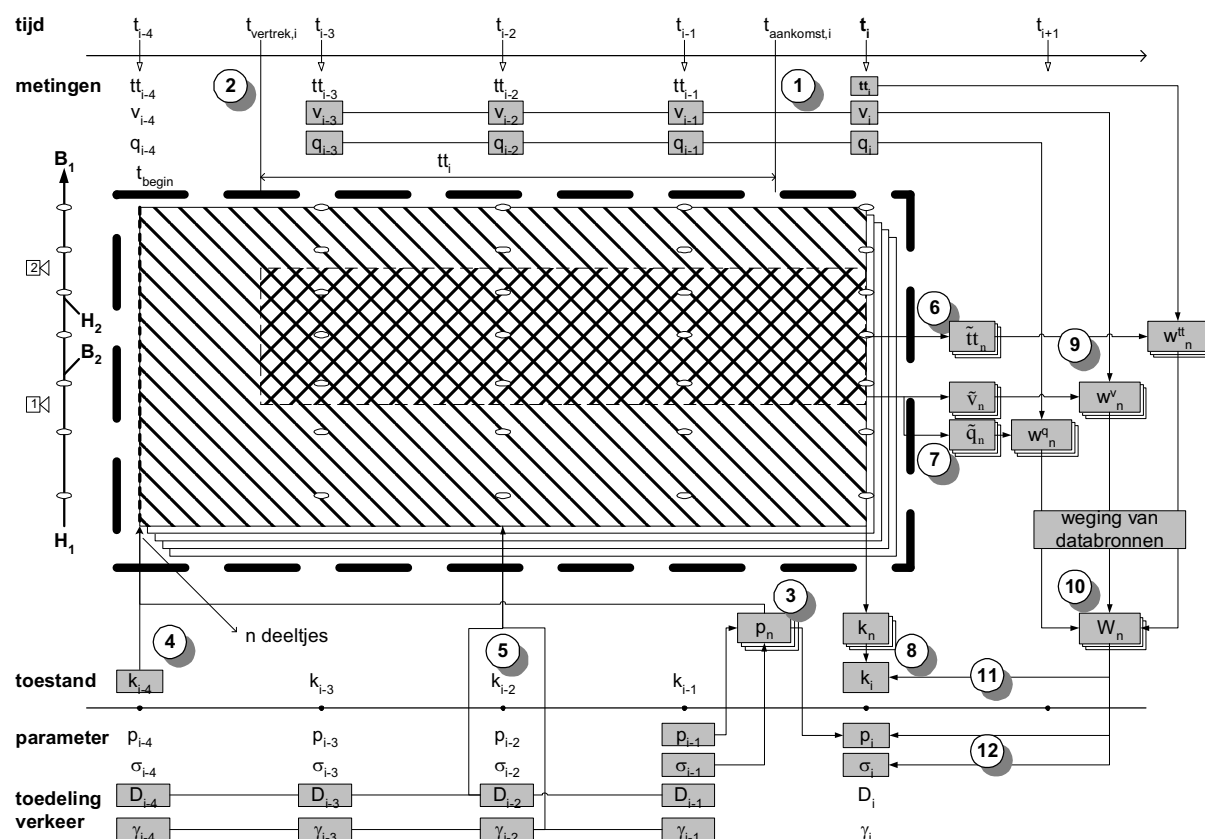
Zoals gesteld in paragraaf 3.3 wordt voor de kern het bestaande verkeersmodel Fastlane (versie 2007-21-02 fase 2) gebruikt. Hieraan zijn geen grote veranderingen nodig. De wijzigingen blijven beperkt tot aanpassingen in de output en het mogelijk maken om binnen het raamwerk aangestuurd te worden. Aan de wijze waarop dit model de verkeersafwikkeling simuleert, zijn geen veranderingen aangebracht. Het zou dus in principe ook mogelijk zijn om, in combinatie met het filter, een ander verkeersmodel te gebruiken om de assimilatie¹⁴ te bewerkstelligen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de variatie van de verschillende deeltjes uitgaat van het gebruik van een fundamenteel diagram en een eerste orde model. Maar met enige aanpassingen is de gedachtegang ook te gebruiken met andere verkeersmodellen.

Het raamwerk daarentegen is geheel nieuw en zal dus in z'n geheel ontwikkeld en geïmplementeerd moeten worden. Net als bij het verkeersmodel is hiervoor Matlab gebruikt. In tegenstelling tot het gebruikte verkeersmodel is de opzet hiervan kenmerkend voor de eigenschappen van het filter. Dit betekent niet dat het presteren ook afhankelijk is van het gebruikte verkeersmodel en de mogelijkheid om het verkeersproces te benaderen, zie ook hoofdstuk 9.

In figuur 6-1 en bijlage 3 is een schematisering gegeven van de opzet van dit filter voor metingen die binnenkomen op moment i . Hierin zijn zowel het raamwerk als de kern (binnen de onderbroken lijn)

¹⁴ Hier wordt de term "assimilatie" gebruikt in plaats van de algemene term "datafusie" omdat de metingen niet worden samengevoegd, maar gelijk worden gesteld.

opgenomen. Daarnaast zijn er de verschillende relaties aangegeven die de stappen vormen die na iedere meting uitgevoerd moeten worden. Voor de overzichtelijkheid is het doorrekenen van de deeltjes (zie paragraaf 6.5) niet weergegeven.



figuur 6-1 Aan de hand van de reistijd- en detectielusmetingen worden voor het betreffende netwerk een aantal deeltjes gemaakt (verschillende parameters), doorgerekend (toedeling verkeer) en beoordeeld. Hiermee wordt de toestand bepaald en de volgende meting voorbereid.

Uitgangspunt is dat na het verstrijken van één minuut¹⁵ metingen beschikbaar komen. Zoals ook eerder gemeld bestaan deze uit metingen door de dubbele detectielussen (met snelheden en intensiteiten) en een reistijdmeting over een (deel)traject. Met deze gegevens moet een goede real-time toestand worden bepaald. Door de werking van deze methode wordt vanaf heden over "toestandsbepaling" gebruikt in plaats van "toestandschatting", zie ook paragraaf 5.3.

In het kort gezegd komt het er bij deze filtertechniek op neer dat aan de hand van de reistijdmeting een gemiddeld vertrekmoment bepaald wordt (stap 1 en 2). Vervolgens worden n verschillende deeltjes gecreëerd met elk een uniek fundamenteel diagram (stap 3). De uitgangswaardes zijn de toestanden op het meetmoment voorafgaand aan het vertrekmoment (stap 4). Voor elk van de deeltjes wordt een schatting van de verkeersontwikkeling gemaakt met hulp van de kern van het filter: het verkeersmodel. Hierbij worden toedelinggegevens op de randen (verkeersvraag en turnfracties) als input gebruikt (stap 5).

Per deeltje worden de reistijd voor het betreffende reistijdtraject en de metingen door detectielussen nagebootst (stap 6 en 7). Tevens worden de toestanden behorende bij het moment van meten opgeslagen (stap 8) om deze later te kunnen gebruiken voor de toestandsbepaling. Door de nagebootste metingen te vergelijken met de werkelijke metingen kan beoordeeld worden welk deeltje het best de werkelijkheid benadert. Dit komt tot uitdrukking in verschillende weegfactoren per databron (stap 9). Afhankelijk van de bijdrage per databron worden de weegfactoren per meettype geassimileerd tot één weegfactor (stap 10).

¹⁵ Voor deze studie is uitgegaan van een meetinterval van één minuut omdat dit ook intervalltijd is voor metingen uit het MoniCa meetnet.

Met de weegfactor kan bepaald worden wat de beste waarden voor de parameters zijn (stap 12). Het uiteindelijke doel van het algoritme, het bepalen van de toestand, kan ook worden bepaald met de weegfactoren en de verschillende eindtoestanden van de deeltjes (stap 11).

In de komende subparagrafen zal nader worden ingegaan op de details per stap en de keuzes die aan dit ontwerp ten grondslag hebben gelegen.

6.2 Stap 1 & 2: Start van het filter

Na het beschikbaar komen van een set metingen zal iedere minuut het filter toegepast worden om de actuele toestand zo goed mogelijk te bepalen. Voor het zover is, moet een aantal stappen worden gezet. De eerste daarvan is het interpreteren van de meetgegevens. Wanneer gebruik gemaakt wordt van werkelijke metingen¹⁶ is de betekenis van de meetgegevens:

1. Per detectielus de harmonisch gemiddelde snelheden van de voertuigen die de betreffende locaties zijn gepasseerd in de minuut daarvoor;
2. Per detectielus het totaal aantal voertuigen dat gepasseerd is gedurende de minuut;
3. De gemiddelde reistijd van voertuigen die in de afgelopen minuut het reistijdtraject hebben afgelegd.

Aangezien gebruik wordt gemaakt van een macroscopisch model (kern) zijn de detectielusmetingen geaggregeerd per locatie en geen strookgegevens.

Voor deze studie is gebruik gemaakt van synthetische data. Daarvoor worden verschillende modellen gebruikt die ieder een eigen wijze hebben om de data te generen. Gedurende de ontwikkeling van het filter is gebruik gemaakt van synthetische data die gegenereerd is met hetzelfde model (Fastlane) als gebruikt wordt in het filter om zo de werking van het algoritme te kunnen verifiëren¹⁷. Bij het genereren van de synthetische data op basis van Fastlane is een reistijdmeting het gemiddelde van de reistijden van alle voertuigen die het reistijdtraject hebben voltooid in de voorgaande minuut. Uit praktische overwegingen worden de gegevens uit de detectielussen echter alleen gebaseerd op de waarden op het moment van meten. Hierdoor ontstaat een verschil in de tijd waar de gegevens betrekking op hebben. Met dit in het achterhoofd is de eerste stap het bepalen van het representatieve aankomstmoment ($t_{\text{aankomst},i}$) voor de gemiddelde reistijdmetingen op tijdstip i . Om deze bias in metingen op te vangen is een translatie van de halve meet- en filterresolutie toegepast, wat neerkomt op 30 seconden. Dit houdt dus in dat aangenomen is dat de gemeten reistijden gelden voor voertuigen die 30 seconden voor het moment van meten (t_i) aangekomen zijn.

Wanneer echter gebruik gemaakt wordt van echte data, of synthetische data uit een microscopisch simulatiemodel¹⁸, is het bovenstaande niet van toepassing. Dan worden de detectielusgegevens namelijk ook gebaseerd op de gehele minuut. En zouden de snelheden en intensiteiten dus eigenlijk ook een halve minuut getransleerd moeten worden. Een andere mogelijkheid is om het representatieve moment van aankomst voor de reistijdmetingen gelijk te trekken aan het moment van meten. Hierbij moet alleen beseft worden dat de toestandsbepaling als resultaat van de filterbewerking 30 sec extra achterloopt op de tijd, naast de gebruikelijke verwerkingstijd¹⁹.

De tweede stap is om het representatieve vertrekmoment ($t_{\text{vertrek},i}$) te bepalen door de gemiddelde reistijd (tt_i) van het representatieve aankomstmoment ($t_{\text{aankomst},i}$) af te trekken. In veel gevallen zal deze tijd niet gelijk zijn met een meetmoment. Voor het maken van een deeltje, zie stap 3, is een begintoestand nodig. Deze toestanden worden echter alleen voor de meetmomenten bepaald en opgeslagen. Daarom is het nodig om het beginmoment (t_{begin}) te bepalen: het laatste moment van meten voorafgaand aan het vertrekmoment. In het voorbeeld in figuur 6-1 is dit t_{i-4} .

¹⁶ Uitgaande van betrouwbare en gecorrigeerde metingen.

¹⁷ Verschillende uitkomsten kunnen niet veroorzaakt worden door verschillende benaderingen van de verkeersafwikkeling van verschillende verkeersmodellen, zie ook paragraaf 6.11.

¹⁸ Bijvoorbeeld FOSIM, zoals gebruikt bij het testen van de prestaties van het model in hoofdstuk 7 en 8.

¹⁹ Zoals het lezen van de meetdata van de centrale database of het koppelen van de kentekeninformatie van de camera aan het einde met de camera aan het begin van het traject.

De geïmplementeerde methode is gericht op één reistijdtraject in het gehele netwerk. Mocht het algoritme aanslaan en een mogelijk verbetering vormen dan is het interessant om het gebruik van meerdere reistijdtrajecten en dus ook meerdere reistijdmetingen mee te nemen.

Opgemerkt moet worden dat het hierboven beschreven proces niet mogelijk is voor het allereerste begin van de filterperiode. Daarbij wordt immers uitgegaan van het beschikbaar zijn van alle metingen uit beide databronnen. Wanneer wordt gewerkt met synthetische data worden de eerste reistijden pas geregistreerd als de eerste voertuigen het traject voltooien. Zo zijn de reistijdmetingen niet vanaf het begin beschikbaar en kunnen dus ook geen toestanden bepaald worden met de beschreven opzet. Voor de toestandsbepalingen na dat moment zijn echter wel eerdere toestanden nodig om de deeltjes op te baseren (stap 4). Hiertoe worden voor de eerste minuten, waarbij nog geen reistijdmetingen beschikbaar zijn, toestanden "bepaald" door het verkeersmodel te laten draaien met als input de startwaardes van de parameters. Dit houdt dus in dat tot het moment van de beschikbaar komen van de eerste reistijdmeting dat de toestand gebaseerd is op het initiële fundamentele diagram. Dit diagram is wellicht niet correct, maar de gegevens ontbreken om het filter te laten werken.

Maar ook bij gebruik van echte data zal de vertraagde eigenschap van reistijdmetingen invloed hebben op de beginperiode van het filterproces. In dit geval zijn alle metingen wel beschikbaar, maar ontbreken de toestanden uit het verleden waarop de deeltjes gebaseerd moeten worden. Ook in dit geval moet het begin gevormd worden door een uitkomsten van Fastlane op basis van het initiële fundamenteel diagram totdat de reistijdmetingen gelijk is aan de verstreken filtertijd.

6.3 Stap 3: Eigenschappen per deeltje

In de derde stap worden de kenmerkende eigenschappen per deeltje bepaald. In tegenstelling tot de benadering bij een PF worden de verschillende deeltjes niet van elkaar onderscheiden door verschillende toestanden, maar door verschillende fundamentele diagrammen. Dit omdat het fundamenteel diagram in wezen niet één vaste relatie is tussen de dichtheid, snelheid en intensiteit. Door verschillende omstandigheden als het weer en het type bestuurder is het in wezen een stochastisch verband, zie ook subparagraaf 4.1. Zo kan de capaciteit (het product is van de kritische dichtheid en de kritische snelheid) van een weg worden beïnvloed door het aandeel vrachtverkeer of het weer. De parameters van het fundamenteel diagram die bij de huidige opzet van het model in stap 4 gebruikt kunnen worden zijn in eerste instantie:

- De snelheid van gebruikersklasse 1 bij vrije afwikkeling,
- De snelheid van gebruikersklasse 2 bij vrije afwikkeling,
- De kritische snelheid,
- De kritische dichtheid,
- De stremmingdichtheid,

Uit testen gedurende het implementeren blijkt het filter helaas niet te werken voor het schatten van het aandeel vrachtverkeer (klasse 2). Dit is overigens wel een belangrijke parameter en kan een zeer bepalende rol spelen. Daardoor is alleen de snelheid bij vrije afwikkeling verschillend per gebruikersklasse.

Het aantal deeltjes (n) hangt af van het aantal parameters dat geschat wordt en het aantal verschillende waardes per parameter. Voor de keuze hiervan geldt dat het filter (hoogst waarschijnlijk) nauwkeuriger wordt met een toenemend aantal deeltjes, maar tevens een langere verwerkingstijd vraagt. Essentieel voor het gebruik is dat de totale verwerktijd minder dan 1 minuut blijft (tot de volgende metingen beschikbaar komen). Om alle unieke combinaties van de parameterwaardes te creëren is dit een exponentieel verband (6-1).

$$n = (\text{aantal parameters})^{\text{aantal waardes per parameter}} \quad (6-1)$$

Vanwege de beperkingen in de rekentijd is gebleken dat het niet mogelijk is om meer dan drie parameters tegelijk te schatten. Dit betekent dus dat een keuze gemaakt moet worden tussen de bovenstaande parameters. In subparagraaf 6.3.1 is te zien hoe een verkeerskundig verschijnsel (de capaciteitsval) een belangrijke rol speelt. De keuze welke parameters exact gebruikt zullen worden zal

aan het einde van dit hoofdstuk worden beargumenteerd naar aanleiding van een aantal testen om de correcte werking van het filter te verifiëren en overige bevindingen.

Deze flexibiliteit zorgt er wel voor dat het aantal deeltjes niet op voorhand vast staat. Om dit op te vangen is gekozen voor een generieke opzet met "sigmafactoren" welke in de alinea's hierna zal worden toegelicht. Omdat gebruik wordt gemaakt van de resultaten van de voorgaande filterstap wordt ook verwezen naar paragraaf 6.10 waar de berekening van de parameterwaardes en de sigma's wordt toegelicht.

De parameterwaardes per deeltje zijn gebaseerd op de resultaten uit de voorgaande filterstap. Zo wordt aan het einde van iedere filterstap per parameter een gewogen gemiddelde vastgesteld. Tevens wordt de spreiding van de parameterwaardes bepaald en bewaard als "sigma". Naast dit is het ook nodig om te weten hoeveel waardes per parameter gebruikt moeten worden. En misschien nog wel belangrijker in welke range de waardes moeten vallen.

De range bestaat uit een kolomvector met een oneven aantal getallen. De mediaan bestaat altijd uit een nul, en de waardes daaromheen geven aan hoeveel keer de "sigma's" afgetrokken of opgeteld moet worden bij de uitgangswaarde van de parameters. In principe is de kolomvector symmetrisch met betrekking tot de groottes van de waardes, maar verschillen ze van teken. Een voorbeeld van deze zogenaamde *sigmafactoren* is: [-2; -0.7; 0; 0.7; 2]. De keuze van de waardes is vrij aan de gebruiker, maar het is aan te raden om de kleinere verschillen rondom de mediaan te nemen ten behoeve van convergentie. Maar ook om de extreme waardes groot genoeg te kiezen om snel op verandering van parameterwaardes te kunnen reageren. Uitgaande van een normale verdeling van de score per parameterwaarde (zie subparagraaf 6.10) zou het bovenstaande voorbeeld 95% van de mogelijke parameterwaardes omvatten. Zoals te zien is worden dus vijf waardes per parameter gebruikt. Uit testen gedurende de implementatie is gebleken dat hierbij het filter convergeert naar de juiste waarde en het aantal deeltjes beperkt kan blijven.

De sigmafactoren zijn universeel voor alle parameters en om alle unieke combinaties te maken wordt, aan het begin van de simulatie, eenmalig de *sigmaFactorMatrix* opgesteld. Voor parameters die niet geschat worden, bevat deze matrix een nul. Voor de parameters die wel worden geschat, worden alle combinaties van de elementen uit de sigmafactoren gemaakt. Bovenstaande wordt verduidelijkt in voorbeeld 1. Het resultaat is een 6x9 matrix met daarin de unieke combinaties voor de actieve parameters (rij 1 en rij 4). Om het aantal deeltjes en de afmeting van de *sigmaFactorMatrix* beperkt te houden zijn slechts drie waardes aangehouden voor de sigmafactoren.

voorbeeld 1 De sigmaFactorMatrix bevat alle combinaties van de elementen uit de sigmafactoren voor de parameters die worden geschat.

```
>>sigmafactoren = [-1.5; 0; 1.5];
>>welkeParsSchatten = [1, 4];
>>sigmaFactorMatrix = sfMatrixMaken(welkeParsSchatten, sigmafactoren)

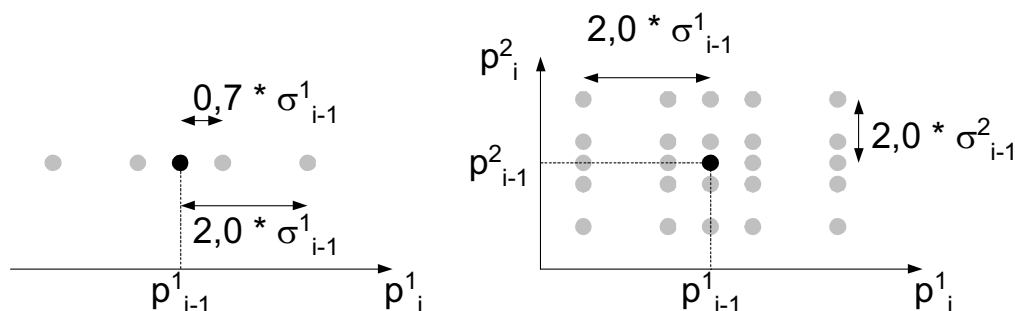
sigmaFactorMatrix =

    -1.5    -1.5    -1.5     0     0     0     1.5     1.5     1.5
     0     0     0     0     0     0     0     0     0
     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    -1.5     0     1.5    -1.5     0     1.5    -1.5     0     1.5
     0     0     0     0     0     0     0     0     0
     0     0     0     0     0     0     0     0     0
```

De *sigmaFactorMatrix* wordt gebruikt om de waardes van de parameters per deeltje te definiëren. De sigmafactoren geven in wezen de relatieve range aan van de waardes die gebruikt moeten worden voor de deeltje-specifieke parameterwaardes. Om deze te vertalen naar absolute waardes worden de geschatte parameterwaardes uit de vorige stap (p_{i-1}), de bijbehorende sigma's (σ_{i-1}) en de betreffende kolom uit de *sigmaFactorMatrix* gebruikt. Daarmee worden met (6-2) de parameterwaardes van het betreffende deeltje vastgesteld. Dit principe is tevens weergegeven in figuur 6-2 voor het schatten van één of twee parameters.

$$\tilde{p}_n = p_{i-1} + \text{sigmaFactorMatrix}(:,n) \cdot \sigma_{i-1} \quad (6-2)$$

p_n : kolomvector met deeltjesspecifieke (n) waarden voor de zes parameters die worden gebruikt.



figuur 6-2 Gebruik van relatieve sigmafactoren [-2; -0.7; 0; 0.7; 2] om per deeltje de combinaties van absolute parameterwaarden vast te leggen voor één of twee te schatten parameters met elk een eigen range.

De waarden worden beperkt door fysieke grenzen. Deze kunnen door de gebruiker worden opgegeven en worden in hoofdstuk 7 gebruikt en gedefinieerd bij de testsituaties. Daarnaast zijn er nog een aantal verkeerskundige voorwaardes. Voor een goede werking van het filter mag de snelheid bij vrije afwikkeling voor alle gebruikersklassen niet lager zijn dan de kritische snelheid. Ook is de snelheid bij vrije afwikkeling van klasse 1 altijd hoger dan die van klasse 2. In voorbeeld 2 is op basis van voorbeeld 1 het resultaat hiervan te zien.

Wanneer het de eerste filterstap betreft zijn er uiteraard geen vorige parameterwaarden en sigma's van de voorgaande stappen. In deze enkele gevallen (de start van het filter) worden waarden gebruikt die door de gebruiker zijn gedefinieerd.

voorbeeld 2 Het definiëren van de parameterwaarden voor de 9 deeltjes op basis van de geschatte parameters van de vorige tijdstap, de bijbehorende sigma's, de sigmaFactorMatrix (zie voorbeeld 1) en de grenzen.

```
>>aantalDeeltjes = 9;
>>waardesPars(:,i-1) = [130; 85; 80; 20; 135; 0.2];
>>sigmasPars(:,i-1) = [10; 0; 0; 2; 0; 0]
>> for p = 1:6
    for i = 1:aantalDeeltjes
        parameters(p,i) = min(max((waardesPars(p,i-1) + ...
            sigmaFactorMatrix(p,i) * sigmasPars(p,i-1)), ...
            ondergrenzen(p)), bovengrenzen(p)));
    end;
end;
parameters

parameters =

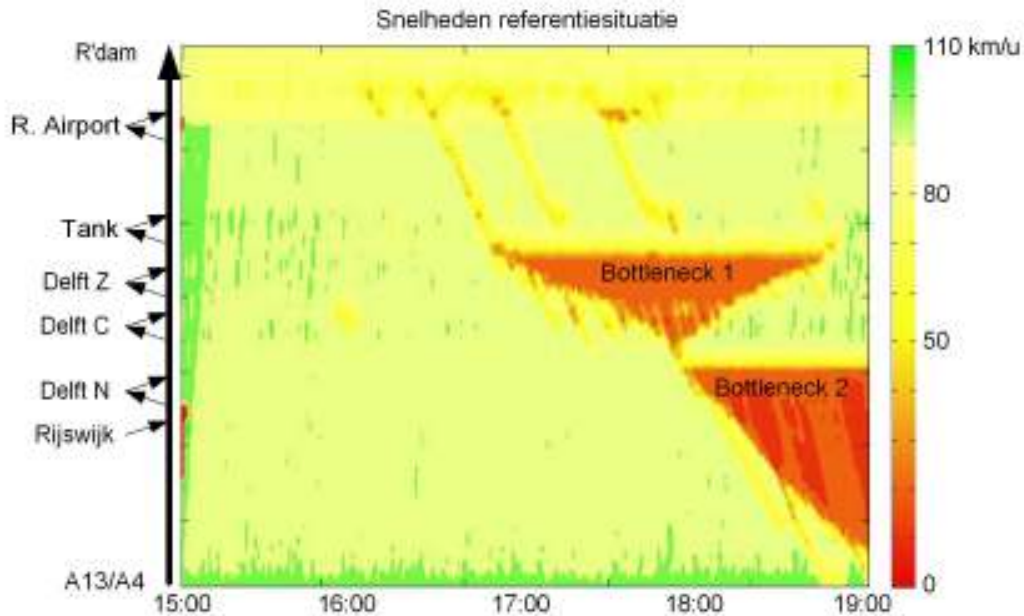
    115    115    115    130    130    130    145    145    145
     85     85     85     85     85     85     85     85     85
     80     80     80     80     80     80     80     80     80
     17     20     23     17     20     23     17     20     23
    135    135    135    135    135    135    135    135    135
     0.2     0.2     0.2     0.2     0.2     0.2     0.2     0.2     0.2
```

6.3.1 Invloed capaciteitsval voor parameterkeuze

In eerste instantie is getracht om, uit praktisch oogpunt, de parameters voor het gehele netwerk gelijk te houden. Als dit niet gedaan wordt en per cel of link een uniek fundamenteel diagram wordt aangehouden, neemt het aantal deeltjes exponentieel toe met het aantal cellen of links van het

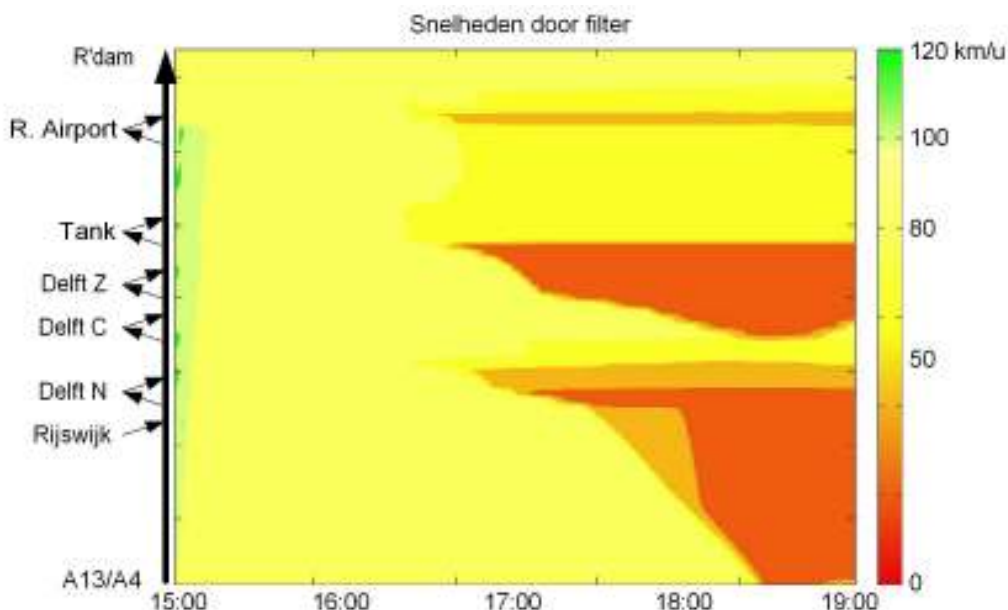
netwerk. Dit heeft een enorme impact op de verwerkingsnelheid. Aan de andere kant is het, zeker bij grotere netwerken met verschillende (weer)condities, wel realistischer. Zo bleek ook het geval tijdens het uitvoeren van testen met het A13 netwerk en de bijbehorende referentiesituaties.

Zo worden, bij gebruik van één fundamenteel diagram, grove fouten gemaakt in de bepaling van de toestand (in dit geval de snelheden)²⁰. Er bevinden zich twee bottlenecks in de betreffende situatie. De eerste bottleneck bevindt zich bij Delft Zuid (zie bottleneck 1 in figuur 6-3) en de andere bevindt zich na de oprit vanuit de richting Rijswijk en Delft N (zie bottleneck 2). Zoals te zien is in de snelheden contourplot van de referentiesituatie treedt bij Delft Zuid congestie op halverwege de tijd. Deze lijkt geactiveerd te worden door terugslaande schokgolven van Rotterdam Airport. Daarnaast is er de congestie bij bottleneck 2, welke pas ontstaat wanneer de congestie van bottleneck 1 teruggeslagen is tot dit punt. Wat neerkomt op een tijdstip 17:55.



figuur 6-3 De snelheden van de referentiesituatie.

²⁰ Voor een uitgebreide opzet van deze testen wordt verwezen naar hoofdstuk 7. Hier wordt alleen ingegaan op de gevolgen voor de opzet van het filter.

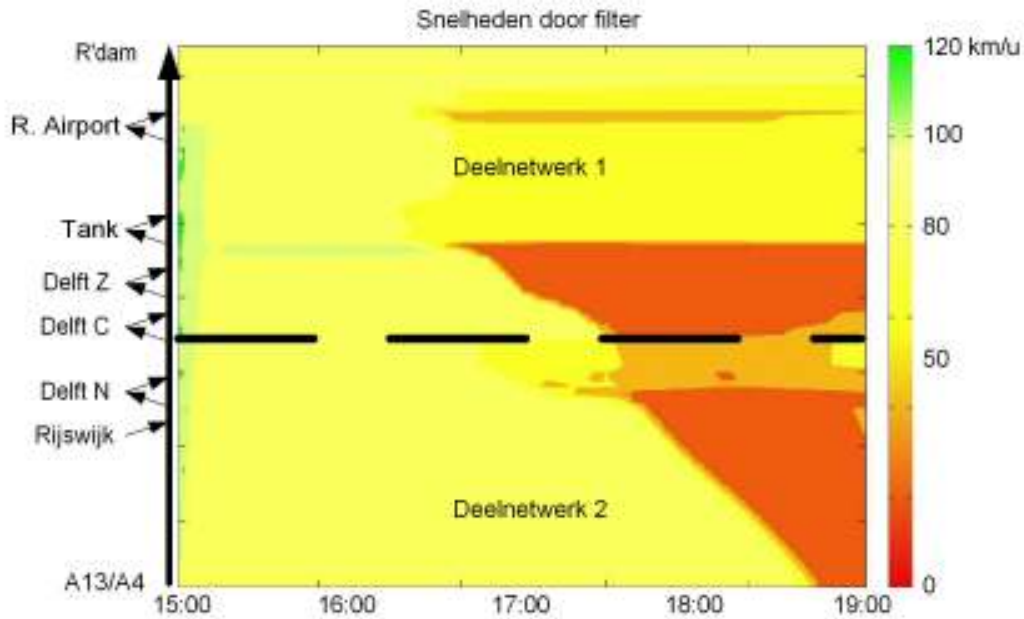


figuur 6-4 Bepaling van de snelheden door het filter bij één fundamenteel diagram voor het gehele netwerk.

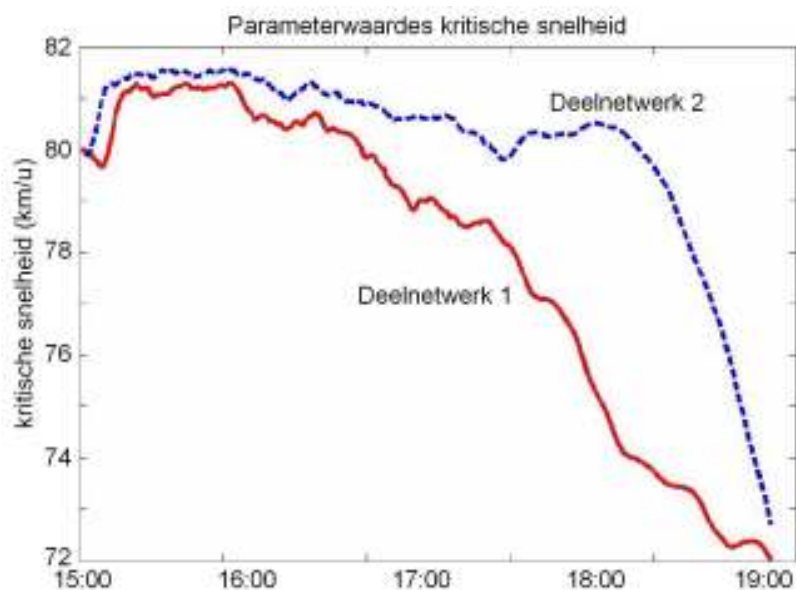
Wanneer wordt gekeken naar de snelheidsbepaling (zie figuur 6-4) die hiervan gemaakt wordt bij gebruik van één fundamenteel diagram valt op dat deze verre van gelijkenis toont. Hoewel de congestie door de eerste bottleneck redelijk op het juiste moment wordt geschat, is daar bij de tweede bottleneck totaal geen sprake van. Deze treedt veel te vroeg op en lijkt nagenoeg gelijk te beginnen met de start van de andere congestie.

Dit kan verklaard worden door de beperking van het fundamenteel diagram dat gebruikt wordt betreffende de capaciteitsval. Deze val houdt in dat de capaciteit bij het intreden van congestie ruim 10% kan dalen. Het microscopisch simulatiemodel waar de synthetische meetdata en de referentiesituatie mee gegenereerd zijn, houdt hier rekening mee. Het fundamenteel diagram dat in Fastlane gebruikt wordt niet. Daarom zal het filter, als reactie op de capaciteitsval, de capaciteit proberen te verlagen. Hiertoe wordt de kritische snelheid en/of dichtheid verlaagd. Voor de toestandsbepaling van de eerste bottleneck heeft dit een positieve invloed. Maar voor de rest van het netwerk heeft dit ook tot gevolg dat de capaciteit fors daalt terwijl het kritische punt nog niet is bereikt op de betreffende delen van het netwerk. Wat de oorzaak is voor het veel te vroeg starten van de congestie bij bottleneck 2.

Daarom is het aan te raden om in dit geval het netwerk op te splitsen in twee delen met iedere een apart fundamenteel diagram. Aangezien bij deze capaciteitsval alleen de kritische snelheid en dichtheid betrokken zijn, is het slechts voor deze twee parameters van belang om deze opsplitsing toe te passen. Wanneer dit gedaan wordt zijn toestandsbepalingen zoals figuur 6-5 het gevolg. Hierbij is voor het hele netwerk gebruik gemaakt van de schatting van één waarde voor de snelheid bij vrije afwikkeling van klasse 1 en per deelnetwerk een kritische snelheid. De ontwikkeling van deze parameterwaardes wordt in de figuur 6-6 getoond waar duidelijk mag zijn dat de capaciteitsval op verschillende momenten optreedt. Het filter reageert hierop door de kritische snelheid van de deelnetwerk 2 later te laten afnemen zodat deze gelijk wordt aan de kritische snelheid (en dus capaciteit) van deelnetwerk 1. De overige parameters worden niet geschat. De lijn geeft de grens tussen de twee deelnetwerken aan. In paragraaf 6.12 zal verder worden ingegaan op de keuze voor de exacte locatie van deze grens en de gevolgen voor de toestandsbepaling.



figuur 6-5 Bepaling van de snelheden bij opsplitsing van het netwerk en met verschillende fundamentele diagrammen per deelnetwerk.



figuur 6-6 De ontwikkeling van de twee kritische snelheden per deelnetwerk.

Deze eigenschap beperkt de mogelijkheid om parameterwaardes te kiezen aangezien al twee waardes nodig zijn om de capaciteitsval te kunnen bevatten. Doordat maximaal drie parameters geschat kunnen worden voor het netwerk van deze afmetingen en bij gebruik van een normale computer, blijft er nog maar één parameter over die geschat kan worden.

6.4 Stap 4 & 5: Creëren deeltjes

Uitgaande van de betreffende begintoestand (k_{i-4}) worden een aantal deeltjes aangemaakt. Zoals in de vorige paragraaf is uitgelegd, kan dit aantal door de gebruiker gedefinieerd worden. Om deze deeltjes door te rekenen met het verkeersmodel zijn twee stappen vereist. Ten eerste wordt in stap 4 de begintoestand voor alle deeltjes geladen. Dit zijn de begintoestanden (een eerdere toestandsbepaling) die horen bij het representatieve beginmoment uit stap 2.

Met behulp van de kern (verkeersmodel) van het filter kan voor ieder deeltje de verkeersontwikkeling berekend worden. De verkeersontwikkelingen worden doorgerekend totdat twee keer de meettijd is verstreken. Wanneer dit niet gedaan wordt en de berekening van het deeltje zal eindigen op het moment van meten, zal een aantal van de deeltjes geen representatieve reistijd kunnen nabootsen, zie ook paragraaf 6.6. Aangenomen wordt dat de dubbele tijd voldoende is om representatieve reistijden te berekenen, aangezien langere reistijden een zo lage score zullen krijgen dat het betreffende deeltje genegeerd wordt bij de weging.

Naast de beginsituatie en de parameterwaardes is hiervoor echter wel, per tijdstap, informatie nodig met betrekking tot de toedeling van het verkeer. Dat wil zeggen: gegevens over het aantal voertuigen van de herkomsten naar de bestemmingen. Hiervoor kan een (dynamische) herkomst-bestemmingsmatrix gebruikt worden. In deze studie is echter gebruik gemaakt van de verkeersvraag en turnfracties. In stap 5 wordt, bij het werken met synthetische data, gewerkt met waardes die van tevoren zijn vastgesteld. Als echte data wordt gebruikt, is een uitbereiding mogelijk door de verkeersvraag en turnfracties te bepalen met behulp van metingen.

6.5 Stap 6: Nabootsen reistijdmetingen

De gebruikte versie van Fastlane biedt niet direct de mogelijkheid om reistijden te genereren als output. Daarom wordt ten behoeve van het bepalen van een reistijd per modelleerstep²¹ de harmonisch gemiddelde snelheden per cel van het reistijdtraject opgeslagen vanaf het representatieve vertrekmoment ($t_{\text{vertrek},i}$). De snelheden zijn een gewogen gemiddelde van de verschillende klassen op basis van dichtheid.

Door de verschillende parameterwaardes is de kans groot dat sommige deeltjes een hogere reistijdschatting zullen veroorzaken. Het is erg aannemelijk dat, door de uiteenlopende parameterwaardes, langere reistijden dreigen te ontstaan dan de tijd tussen het representatieve vertrekmoment en het moment van meten. Zeker wanneer met echte data of synthetische data gebaseerd op microscopische simulatiemodellen wordt gewerkt. De translatie van 30 seconden wordt dan niet meer toegepast (zie paragraaf 6.2) omdat meettijd gelijk is aan het aankomstmoment. Bij de uitwerking van de methode wordt hiervoor als oplossing aangedragen dat, na het moment van meten, een stationaire situatie wordt verondersteld om toch reistijden te kunnen berekenen. Deze aanpak kan echter tot een afwijking leiden. Het is consequenter om de deeltjes langer door te rekenen en, op basis van de te verwachten verkeersontwikkeling voor dat deeltje, de reistijd te genereren. Aangezien vooraf de reistijden per deeltje niet bekend zijn en om oneindig lang doorrekenen²² te voorkomen, worden de deeltjes doorgerekend gedurende de dubbele tijd van de meting. Daarna wordt alsnog stationariteit verondersteld door de laatste tijdsgrens van de PLSB methode op oneindig te zetten.

Aan de hand van deze snelheden kan een inschatting worden gemaakt voor de tijd die voertuigen nodig hebben om het traject van cameralocatie 1 tot cameralocatie 2 af te leggen. Hiervoor kan de PLSB methode worden gebruikt, zie ook subparagraaf 4.3. In het kort komt het daarbij er op neer dat de reistijd over een afgebakende afstand wordt bepaald door te veronderstellen dat de snelheid tussen twee opeenvolgende locaties (waarvoor puntmetingen beschikbaar zijn) lineair verloopt tussen beide waardes. Dit is echter niet nodig wanneer een verkeersmodel wordt gebruikt en celsnelheden worden gegenereerd. In plaats van het lineair laten verlopen van de snelheid tussen twee locaties kan celsnelheid worden gebruikt.

6.6 Stap 7 & 8: Nabootsen detectormetingen en eindtoestanden

Gedurende de simulatie van de deeltjes worden de snelheden en intensiteiten voor alle klassen opgeslagen. Dit wordt alleen gedaan op de momenten waarop de werkelijke metingen (t_{i-3} , t_{i-2} , t_{i-1} en t_i) beschikbaar zijn en voor die cellen waar een detector in ligt. De celgegevens worden dus tot en met het moment van meten bijgehouden en vergeleken met de metingen. Hierbij worden de

²¹ Voor de testsituatie is dit 3,75 seconden. Bij het verkeersmodel Fastlane is de tijdstap afhankelijk van de lengte van de links en de maximale snelheid, zie ook paragraaf 4.4.

²² Dit zou kunnen wanneer een deeltje de congestie hevig overschat en dat daardoor de snelheid gedurende lange tijd nul is op (een deel van) het netwerk, waardoor de reistijd richting het oneindige gaat.

metingen en detectorgegevens op t_{begin} niet meegenomen omdat de deeltjes geen verschillende detectorgegevens zullen opleveren aangezien ze allen dezelfde begintoestand hebben.

Het algoritme is zo opgezet dat de locatie van de detectoren wordt bepaald door de verdeling van de cellen. Een detector ligt namelijk altijd in het midden van een cel en de gebruiker kan specificeren welke cellen een detector bevatten. Wanneer een bestaande situatie gesimuleerd wordt, moet het netwerk en de cellen dus zo worden gedefinieerd dat de celgrenzen exact tussen de detectoren liggen, zie ook paragraaf 7.1. Dit lijkt enigszins complex, maar de reden hiervoor is dat de detectorgegevens op een eenvoudigere wijze zijn na te bootsen door de celwaardes voor snelheden en intensiteit per klasse (m) te gebruiken²³:

$$\tilde{v}_{t,x} = \frac{\sum_m k^m \cdot v^m}{\sum_m k^m} \quad (6-3)$$

$$\tilde{q}_{t,x} = \sum_m q^m \quad (6-4)$$

v^m : de celsnelheid voor gebruikersklasse m .

q^m : de celintensiteit voor gebruikersklasse m .

k^m : de celdichtheid voor gebruikersklasse m .

Een andere mogelijkheid is om het netwerk zo te ontwerpen dat de detectoren juist op de grenzen van de cellen te leggen. Dit heeft als voordeel dat de intensiteiten correcter bepaald kunnen worden door de fluxen tussen de cellen te gebruiken. Zo hoeft voor de intensiteit geen homogeniteit over de gehele cel aangenomen te worden. Daarentegen is het juist erg complex om de juiste snelheid te bepalen.

Vanwege het langer doorrekenen van de deeltjes, zoals beargumenteerd in de paragraaf hiervoor, worden de eindtoestanden opgeslagen op het moment van meten. Deze toestanden vormen de basis voor de werkelijk toestandsbepaling behorende bij het tijdstip van meten.

6.7 Stap 9: Weegfactoren reistijd- en detectormetingen

Door de nagebootste reistijd- en detectormetingen per deeltje te vergelijken met de werkelijke metingen, is te bepalen in hoeverre het betreffende deeltje de werkelijkheid benadert. Hierbij is gekozen voor de vergelijkingen zoals te zien in (6-5) t/m (6-7). Deze formules zijn proefondervindelijk ontwikkeld, zo blijkt het nemen van het kwadraat in (6-5) te zorgen voor aanzienlijk sneller convergeren. De redenering hierachter is niet verder onderzocht en zo kunnen wellicht verdere verbeteringen worden behaald wanneer dit wel plaatsvindt. Zo zou men bijvoorbeeld de weging kunnen laten afhangen van de optredende toestand. Of zelfs indicatie van de mate waarin de toestand, behorende bij de metingen, en de modelvoorspelling per deeltje van elkaar afwijken, zoals dat bij een EKF gebeurt. Ten behoeve van de inzichtelijkheid is dit buiten beschouwing gelaten en zijn de onderstaande vergelijkingen gebruikt.

²³ Mits men aanneemt dat stationairiteit geldt gedurende de simulatiestap en homogeniteit voor de gehele cel.

$$w_n^t = \frac{1}{(\tilde{t}_n^{-1} - t^{-1})^2 + 1^{-50}}; \quad (6-5)$$

$$w_n^v = \sum_{t=t_{begin}+1}^{t_i} \frac{1}{\Delta v_{t,n} + 1^{-50}}; \quad (6-6)$$

$$w_n^q = \sum_{t=t_{begin}+1}^{t_i} \frac{1}{\Delta q_{t,n} + 1^{-50}}; \quad (6-7)$$

tt : reistijdmeting, \tilde{t}_n : reistijdschatting voor deeltje n.

De minimale, constante van 1^{-50} is toegevoegd om te voorkomen dat de berekening vastloopt. Zo bleek tijdens de implementatie dat het anders fout gaat wanneer de verschillen tussen de metingen en de nagebootste gegevens door het filter nul zijn. In dit geval wordt door nul gedeeld en zou de waarde oneindig ontstaan, welke niet gebruikt kan worden in verdere berekeningen.

Een andere toevoeging die gedaan is ten behoeve van een betere werking is de wijze waarop de weegfactor voor de reistijd is berekend. In eerste instantie werd de inverse genomen van het verschil tussen de nagebootste waarde en de metingen in het kwadraat. Een kleine verbetering in de resultaten werd bereikt door de berekeningswijze uit (6-5) aan te houden en het verschil van de inverses van reistijden te gebruiken. De redenering is dat door het nemen van de inverse een soort snelheid ontstaat en zo beter te combineren is met de gebruikte weegwijze voor de snelheid.

De weging van de gegevens uit de detectoren is complexer dan die van de reistijden doordat het niet om één waarde gaat, maar om meerdere (zowel in de tijd- als ruimtedimensie). De weging vindt gescheiden plaats voor de intensiteiten en de snelheden²⁴. Hoewel in deze studie wordt uitgegaan van gecorrigeerde data (zie paragraaf 3.3) zou het bij het gebruik van echte data mogelijk zijn dat de data fout of onbetrouwbaar zijn. Wanneer dit optreedt voor één minuut gedurende de tijd van simuleren ontstaan mogelijk enorme verschillen. Men dient te voorkomen dat deze enkele enorme afwijking zorgt voor het onbruikbaar worden van alle metingen. Met dit in het achterhoofd wordt de ruimtedimensie gevat in één waarde, per meetmoment, de RMSE van de nagebootste en de gemeten waarden genomen van alle locaties, zie (6-8) en (6-9). De tijdsdimensie wordt opgevangen door sommatie van de inverses van de verschillen per minuut genomen (inclusief de minimale, constante) voor de bijgehouden meetmomenten. Door eerst de inverse te nemen en daarna te sommeren wordt voorkomen dat slechts een enkele foute meting zorgt dat alleen de betreffende minuut wordt verwaarloosd (en niet de metingen van alle minuten).

$$\Delta v_{t,n} = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (\tilde{v}_{t,x,n} - v_{t,x})^2} \quad (6-8)$$

$$\Delta q_{t,n} = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (\tilde{q}_{t,x,n} - q_{t,x})^2} \quad (6-9)$$

$v_{t,x}, q_{t,x}$: snelheids- en intensiteitmeting op tijdstip t, voor detector x.

$\tilde{v}_{n,t,x}, \tilde{q}_{n,t,x}$: snelheid en intensiteit voor deeltje n, op tijdstip t, voor detector x.

6.8 Stap 10: Datafusie: assimileren van metingen

Het proces zoals beschreven in de paragrafen 6.5 tot en met 6.7 resulteert in drie soorten absolute weegfactoren per deeltje, afkomstig van twee databronnen:

²⁴ Uitgangspunt hierbij is dat reeds datacorrectie is toegepast en de snelheidsmetingen als harmonisch gemiddelde snelheden beschouwd mogen worden.

1. Reistijd-weegfactor, zie (6-5) (reistijdmetingen);
2. Snelheid-weegfactor, zie (6-6) (detectormetingen);
3. Intensiteit-weegfactor, zie (6-7) (detectormetingen).

Om beide bronnen te gebruiken voor één toestandsbepaling is het nodig de bijbehorende weegfactoren te combineren tot één weegfactor per deeltje. Bij dit assimilieren is het van belang om de verschillende databronnen tegen elkaar af te wegen. Hiertoe worden de afzonderlijke factoren relatief en dimensieloos te maken. Voor deze normalisatie wordt per soort weegfactor de specifieke waarde van het deeltje gedeeld door de som van de alle waarden:

$$W_n^{tt} = \frac{w_n^{tt}}{\sum_n w_n^{tt}} \quad (6-10)$$

$$W_n^v = \frac{w_n^v}{\sum_n w_n^v} \quad (6-11)$$

$$W_n^q = \frac{w_n^q}{\sum_n w_n^q} \quad (6-12)$$

Zo ontstaan per deeltje drie (per type meting) genormaliseerde weegfactoren waarmee één geassimileerde, genormaliseerde weegfactor samengesteld kan worden. Hierbij kunnen vele aspecten worden meegenomen, zoals:

- Snelheidsmetingen uit detectielussen zijn bij lagere snelheden meestal minder betrouwbaar dan de intensiteitsmetingen [14];
- Intuïtief kan worden verondersteld dat, door het historische karakter, de bruikbaarheid van reistijdmetingen minder wordt naarmate de gemeten tijd toeneemt. Tegelijkertijd zijn meer detectormetingen beschikbaar wat pleit om de weging van de gegevens uit de reistijdgegevens afhankelijk te maken van de reistijdmeting;
- Wellicht presteert het ene monitoringsysteem bij slecht weer beter dan het andere systeem;
- Het aantal detectorlocaties;
- De beschikbaarheid, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de detectielusgegevens.

Het belangrijkste aspect uit deze opsomming is de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid waarmee beide systemen meten. Ook kunnen voor de gegevens uit detectielussen onderlinge verschillen gelden. Vooral de betrouwbaarheid van de detectielussen laat vaak te wensen over. De reistijdmetingen hebben hogere nauwkeurigheid. Daarnaast zijn ze, voor het bepalen van gemiddelde reistijden zoals in dit onderzoek, betrouwbaarder dan detectielusmetingen, zie tabel 6-1 [7, 8].

tabel 6-1 Nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en gebruikte standaarddeviatie per type meting [7, 8].

Type meting	Nauwkeurigheid	Betrouwbaarheid	p^j (%)
Detectielussen – snelheden	96%	Matig	4
Detectielussen – intensiteiten	95% – 98%	Matig	5
Reistijdcamera's – reistijden	95% – 99%	Goed	3

Naarmate een type meting nauwkeuriger en betrouwbaarder is dient deze meer meegeteld te worden dan een minder nauwkeurigere en/of betrouwbaardere meting. Om dit op te vangen maakt het filter gebruik van de metingspecifieke bijdrage (φ^j) die een indicatie geeft voor de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid aangeeft voor datatype j (6-13). Voor het bepalen van de bijdrage per type meting wordt in deze studie een vuistregel [10] gebruikt. Deze bepaalt de onderlinge weging op basis van de procentuele afwijking van de fout in de meting van de meetdata. In de 4^e kolom van tabel 6-1 staan de gebruikte waarden. Voor verdere toepassing wordt verwezen naar hoofdstuk 7.

$$\varphi^j = (p^j)^{-2} \quad (6-13)$$

Met behulp van deze metingspecifieke bijdrage kan één genormaliseerde weegfactor (W_n) voor elk deeltje dat representatief moet zijn voor het presteren van het betreffende deeltje n bepaald worden. Zoals te zien is in (6-14) wordt dit gedaan door de genormaliseerde weegfactoren (gewogen) te middelen op basis van de metingspecifieke bijdrages.

$$W_n = \frac{\sum_j W_n^j \cdot \varphi^j}{\sum_j \varphi^j} \quad (6-14)$$

Bij het gebruik van werkelijke data zal dan ook onderzocht moeten worden of deze aanname stand houdt. Wanneer met synthetische data gewerkt wordt is dit een aspect waar rekening mee gehouden moet worden bij het genereren van de data, zie ook hoofdstuk 7.

6.9 Stap 11: Bepaling toestand

Door de assimilatie via de weegfactoren, zoals beschreven in de vorige subparagraaf, uit te voeren is het mogelijk dat twee verschillende deeltjes vrijwel even goed scoren. Dit kan komen door een kleine afwijking van de twee parameterwaardes, respectievelijk positief en negatief, waardoor beiden vrij goed scoren. Een andere mogelijkheid is wanneer de verschillende databronnen elkaar tegenspreken en twee deeltjes als beste naar voren komen met totaal afwijkende parameterwaardes. Zeker in dit laatste geval zou het onverstandig zijn wanneer één van beide deeltjes als de waarheid beschouwd zou worden. En vervolgens de bijbehorende eindtoestand te beschouwen als meest waarschijnlijke toestand.

Daarom is gekozen om de toestandsbepaling te baseren op een gewogen gemiddelde van alle toestanden van de deeltjes op het moment van meten. Waarbij uiteraard goed scorende deeltjes meer worden meegewogen dan slecht presterende deeltjes. Aangezien de som van de totale weegfactor één is, wordt de toestand dus als volgt berekend:

$$k_i = \sum_n k_n \cdot W_n \quad (6-15)$$

Binnen het verkeersmodel is de dichtheid de enige dynamische variabele, maar dit betekent niet dat de dichtheid de enige mogelijke indicatie voor de toestand is. De toestand kan ook uitgedrukt worden in snelheid of intensiteit en deze maken gebruik van de klasse specifieke dichtheden. De celdichtheden per klasse leiden via het fundamenteel diagram tot celsnelheden per klasse. De toestandsbepaling uitgedrukt in snelheid is het harmonische gemiddelde en de intensiteit wordt via de verkeerskundige relatie als product van de dichtheid en de snelheid (zie ook paragraaf 4.2) bepaald.

Op deze wijze kan de toestand worden weergegeven doormiddel van de drie indicatoren dichtheid, snelheid en intensiteit. Zoals ook in de komende hoofdstukken naar voren zal komen, gebeurt dit tijdens het testen veelal achteraf in een contourplot voor de gehele simulatieperiode. Uiteraard kan dit ook de toestand real-time worden weergegeven (praktische toepassing), maar dit is voorlopig niet nodig zolang het gaat om het testen en het beoordelen van verschillende configuraties. Voor de visualisatie is gebruik gemaakt van een interface die gelijk is aan de Fastlane Result viewer. Zoals ook in paragraaf 6.11 uitgelegd zal worden kan zo een onnodig verschil vermeden worden.

6.10 Stap 12: Vaststellen nieuwe waardes parameters en sigma's

Ondanks dat het doel van het filter is bereikt, het bepalen van de toestand op het meetmoment (k_i), zijn nog enkele handelingen nodig ter voorbereiding op de volgende toestandsbepaling op t_{i+1} . Ten eerste moeten de parameterwaardes worden bepaald. Deze zijn namelijk nodig als uitgangspunt voor het bepalen van de parameterwaardes voor de volgende tijdstap (p_{i+1}). Dit gebeurt op een vergelijkbare wijze als het bepalen van de toestand, een gewogen gemiddelde van alle deeltje parameterwaardes:

$$P_i = \sum_n P_n \cdot W_n \quad (6-16)$$

Zo wordt de waarde van de parameter dus bepaald door het presteren van het deeltje en de bijbehorende parameterwaarde. Voor het voorbeeld (dat gebaseerd is op de parameters uit voorbeeld 2) betekent dit dat de waarde voor de snelheid bij vrije afwikkeling voor gebruikersklasse 1 en de kritische dichtheid een andere waarde krijgen. Dit is respectievelijk 126,6 km/u (was 130 km/u) en 19,88 vtg/km (was 20 vtg/km). De overige parameters worden niet geschat en wijzigen dus ook niet. Alle parameterwaardes zullen de basis vormen voor de deeltjes die voor de volgende filterstap gecreëerd zullen worden.

voorbeeld 3 Het schatten van de parameters op basis van de genormaliseerde weegfactoren (W) en de bijbehorende parameterwaardes per deeltje uit voorbeeld 2.

```

W =
    0.18    0.19    0.17    0.07    0.10    0.09    0.09    0.07    0.04

>>waardesPars(:,i) = sum((parameters .* repmat(W, 6, 1)), 2)

waardesPars =

    124.9000
     85.0000
     80.0000
     19.8800
    135.0000
     0.2000

```

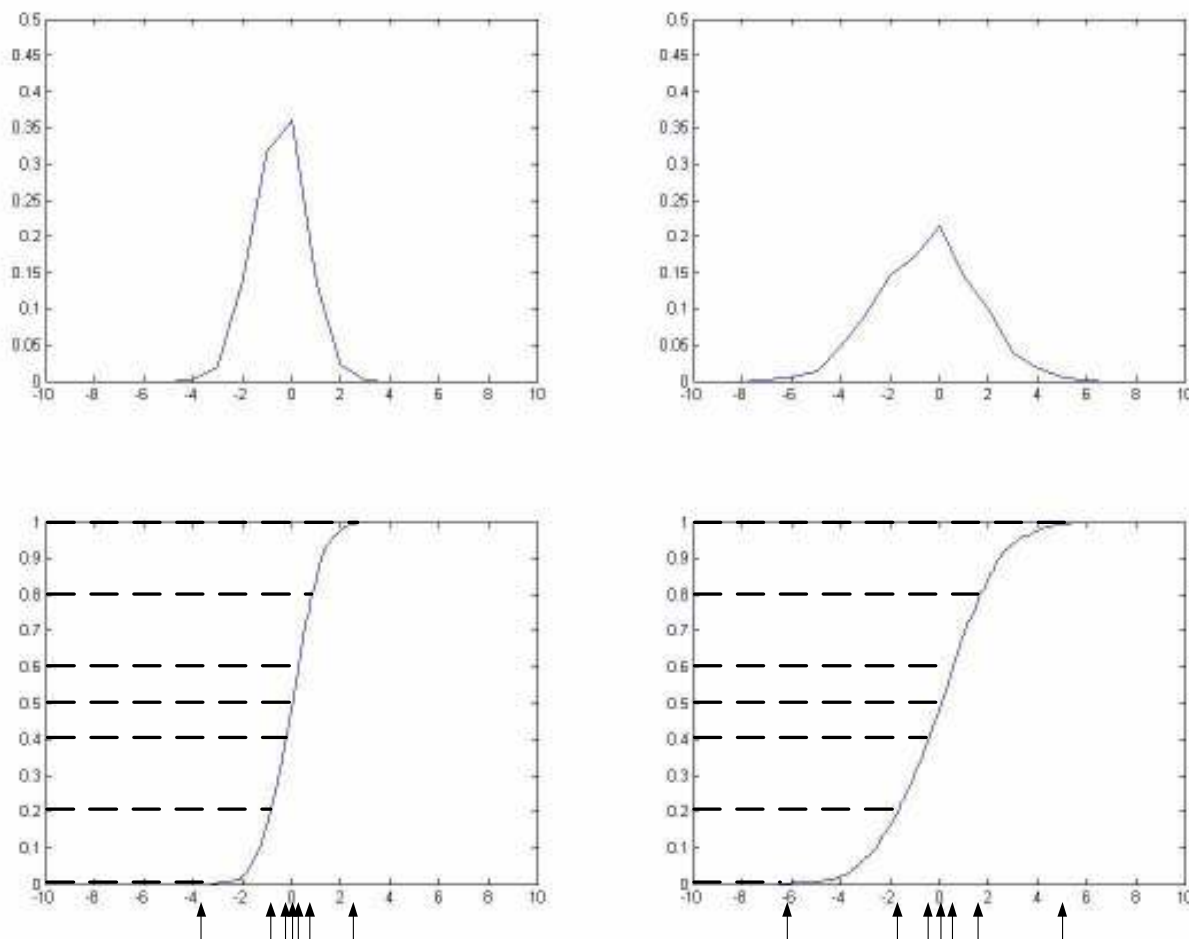
Naast deze uitgangswaardes is ook informatie nodig om een verdeling van de parameterwaardes per deeltje te kunnen maken (zie ook stap 3 in paragraaf 6.3). Hiervoor worden in de laatste stap van het filter tevens de "sigma" per parameter bepaald. Een grove manier om bijvoorbeeld 11 verschillende deeltjes te creëren is door factoren te kiezen van 0.5 tot 1.5 in stappen van 0.1. Deze wijze gaat er vanuit dat de parameterwaarde in twee opeenvolgende minuten maximaal 50% afwijkt van de vorige waarde. Voor sommige parameters is dit een redelijke aanname, zo kan bijvoorbeeld de snelheid bij congestie dalen van 90 naar 50 wanneer plotseling een zware regenbui binnen een tijdsbestek van één minuut optreedt. Maar voor andere waardes, zoals de kritische dichtheid is dit waarschijnlijk overdreven en alleen te gebruiken wanneer de "werkelijke" waarde geheel onbekend is²⁵. Een ander nadeel is dat de waarde oscilleert rondom de echte waarde, door de grove factorverdeling (stappen van 10%). Of dat deze een plotselinge uitschieter maakt wanneer de betreffende parameter bijna geconvergeerd is.

Om het filter goed te laten reageren op wijzigende parameterwaardes is het dus nodig dat de deeltjes in stap 3 een grote spreiding hebben zolang de juiste waarde slecht wordt benaderd. In dergelijke gevallen moet de "sigma" dus groot zijn. Terwijl deze juist kleiner moet worden wanneer de parameterschatting de waarheid meer en meer benadert. Daarom worden de sigma's gelieerd aan de genormaliseerde, totale weegfactoren (W_n). De weegfactoren per deeltje kan men zien als de kans dat de bijbehorende parameterwaarde klopt voor de betreffende situatie.

Een mogelijkheid zou zijn om op basis van de kansverdeling (figuur 6-7 linksboven) een cumulatieve kansverdeling te construeren, zie figuur 6-7 linksonder. Hierbij kan een set factoren worden bepaald die afhangt van de spreiding. Zo zouden de factoren gebaseerd kunnen zijn op een vaste grenzen op de y-as van de cumulatieve verdeling (bijvoorbeeld: 1, 20, 40, 50, 60, 80, en 99%). De bijbehorende waardes op de x-as vormen de basis voor de factorwaardes. Hierdoor kan de samenstelling van de factor mede worden bepaald door de spreiding. Ter illustratie is aan de rechterkant van figuur 6-7 een

²⁵ Dit is echter meestal niet het geval, uit verkeerskundige theorieën en onderzoeken zijn de waardes van de meeste parameters redelijk in te schatten.

verdeling weergegeven met een grotere spreiding. Bij gebruik van dezelfde verdeling op de y-as leidt dit tot minder gecentreerde factorwaarden, zie figuur 6-7 rechtsonder.



figuur 6-7 De twee verdelingen boven (scores deeltjes) met verschillende spreidingen leiden tot een verschillende cumulatieve verdeling onder. Zo zijn, afhankelijk van de scores van de deeltjes verschillende factorwaarden te creëren (bij gebruik van dezelfde grenzen op de y-as).

Dit bleek echter zeer complex om te implementeren en daarom is gekozen om een andere methode toe te passen. Deze is tevens gebaseerd op het idee dat de genormaliseerde, totale weegfactoren (W_n) een kansverdeling vormen. Er is gekozen om een standaarddeviatie uit te rekenen en deze vervolgens via de sigmafactoren te gebruiken bij het differentiëren van de deeltjes, zie voorbeeld 1. Zo wordt een *populatie* van parametercombinaties (en dus fundamentele diagrammen, zie paragraaf 6.3) samengesteld waarbij het aantal keer dat de set parameterwaarden voorkomt, gebaseerd wordt op de genormaliseerde weegfactor. Aangezien de weegfactoren bestaan uit fracties is tevens een nauwkeurigheid²⁶ (α) gedefinieerd in de vorm van een getal dat de totale grootte van de populatie bepaalt. De standaarddeviatie van deze populatie bepaalt de sigma die wordt gebruikt om in de volgende filterstap, naast de geschatte parameterwaarde, de betreffende parameterwaarden per deeltje te definiëren. Hetgeen hiervoor is beschreven zal in voorbeeld 4 worden toegelicht.

²⁶ Standaard is dit 100 keer het aantal deeltjes.

voorbeeld 4 Het bepalen van de sigma's op basis van de genormaliseerde weegfactoren (W) en de parameterwaardes per deeltje uit voorbeeld 2.

```

W =
    0.18    0.19    0.17    0.07    0.10    0.09    0.09    0.07    0.04

>>freq = round(W * nauwkeurigheid);
populatie = -1*ones(size(parameters,1), sum(freq,2));
b = 1;
e = 0;
for a = 1:size(parameters,2)
    if freq(a) > 0
        e = e + freq(a);
        populatie(:,b:e) = repmat(parameters(:,a), 1, freq(a));
        b = b + freq(a);
    end
end
sigmasPars(:,i) = max(std(populatie,1,2), minimaleSigmas)

sigmasPars =

    11.8528
         0
         0
     2.3970
         0
         0

```

Door deze berekening zullen de deeltjes in de volgende filterstap gekenmerkt worden door alle unieke combinaties van 113.0 km/u, 124.9 km/u, 136.8 km/u (snelheid bij vrije afwikkeling voor gebruikersklasse 1) en de 17.48 vtg/km, 19.88 vtg/km en 22.28 vtg/km (kritische dichtheid).

Wanneer de schatting van een parameter erg goed zou zijn en deeltjes die een andere parameterwaarde hebben erg slecht presteren is het mogelijk dat de sigma erg klein wordt. Om te zorgen dat het filter in staat blijft te reageren op veranderende omstandigheden zijn de sigma's aan de onderkant begrensd. Deze waardes zijn te definiëren door de gebruiker. In het voorbeeld zijn deze waardes buiten beschouwing gelaten (waarde is nul) ten behoeve van de overzichtelijkheid, bij het testen in hoofdstuk 7 zullen de waardes worden gegeven.

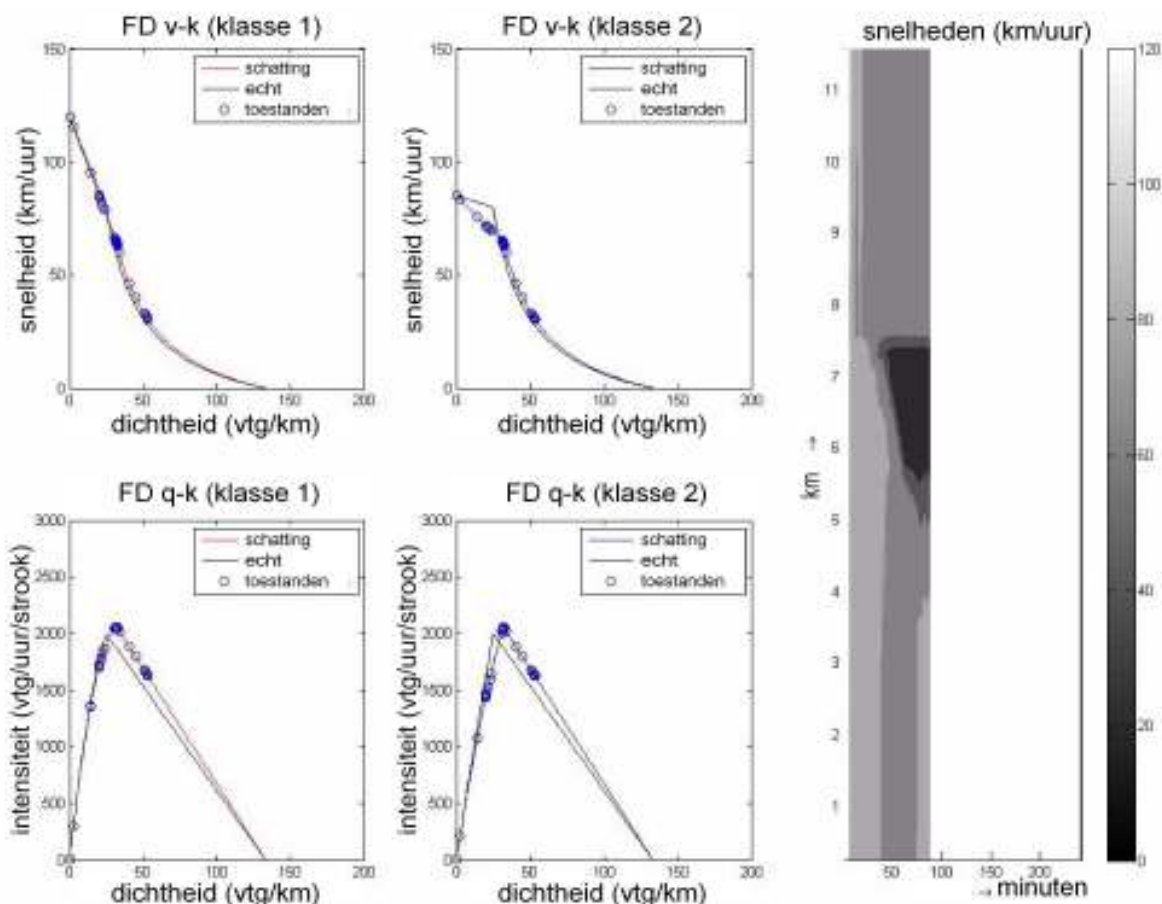
6.11 Verificatie algoritme in eenvoudig testomgeving

Na de implementatie zijn een aantal tests uitgevoerd om de werking te verifiëren. In deze paragraaf zullen enkele van die resultaten worden getoond waaruit blijkt onder welke omstandigheden het filter correct werkt. Om te voorkomen dat de uitkomsten beïnvloed worden door externe factoren is Fastlane gebruikt met vergelijkbare simulatie- en voertuiginstellingen voor het genereren van de data. Zo kunnen verschillen niet ontstaan door een andere benadering van de verkeersafwikkeling. Tevens biedt dit het voordeel dat vergelijken met de werkelijke waardes van de geschatte parameters mogelijk is.

Daarnaast zijn er een aantal factoren die wellicht tot beperkte afwijkingen kunnen leiden. Deze zijn echter inherent aan het filteren veelal het gevolg van aannames. Mogelijk zijn deze aannames voor verbetering vatbaar, maar naar alle waarschijnlijkheid zullen de gevolgen in het niet vallen bij die van de een andere gegevensbron. Een aantal voorbeelden van de aannames die waarschijnlijk een marginaal effect hebben zijn:

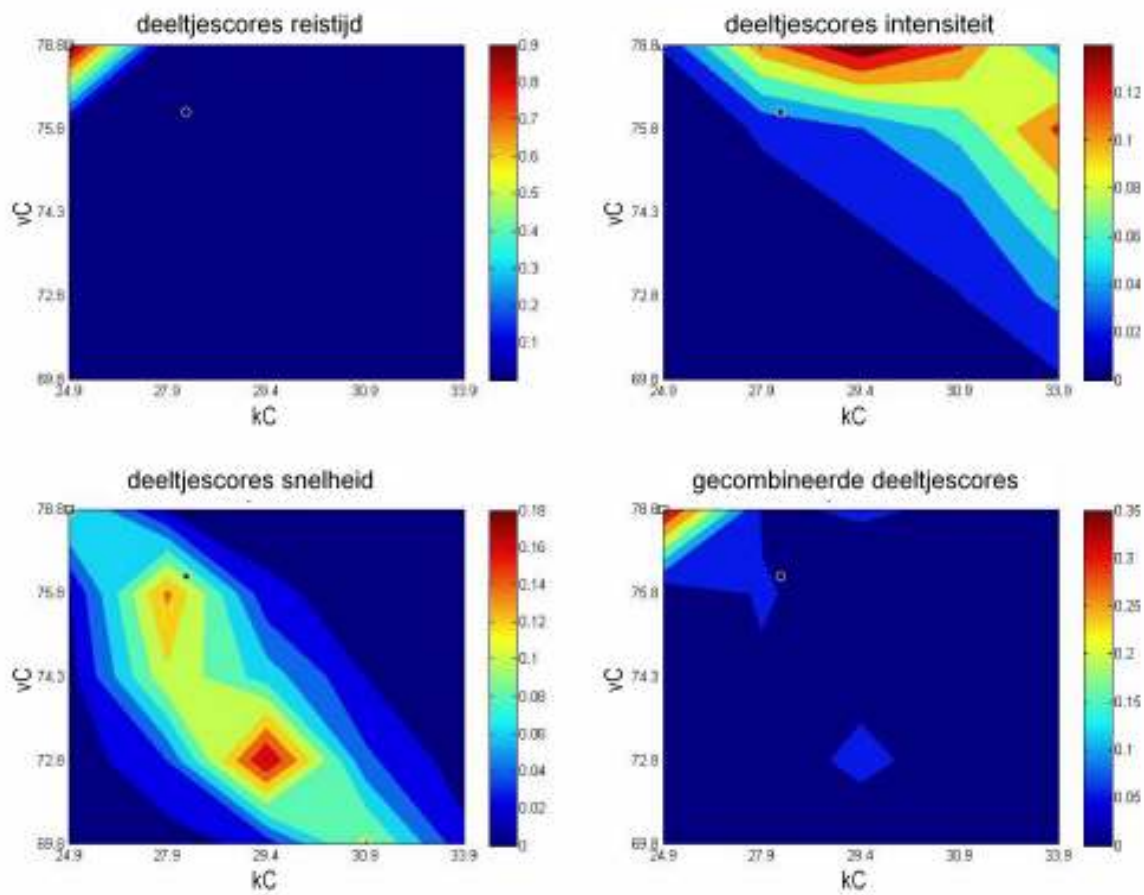
- Het aggregeren van de meetdata per minuut,
- De translatie van 30 seconden om het verschil in meetmoment te compenseren,
- Beperkt doorrekenen van de deeltjes tot tweemaal de reistijdmeting,
- De onder- en bovengrenzen van de parameterwaardes,
- De ondergrens van de sigma's.

De output van het filter ten behoeve van het verifiëren bestaat uit een aantal onderdelen. Veelal zijn dit hulpmiddelen die alleen nuttig zijn bij de verificatie. Zo worden gedurende het simuleren de schatting(en) van de parameterwaarde(s) geplot ten opzichte van de werkelijke waarde (zoals bijvoorbeeld figuur 6-12). Daarnaast worden, op basis van de (geschatte) parameterwaardes na iedere simulatiestap, de fundamentele diagrammen getoond in vergelijking met het fundamenteel diagram dat gebruikt is bij het genereren van de meetdata. In hetzelfde venster wordt tevens een simpele weergave van de real-time toestandsbepaling gegeven. Een voorbeeld van deze output is te zien in figuur 6-8.



figuur 6-8 Voorbeeld van outputvenster gedurende de simulatie met fundamentele diagrammen (geschat en origineel, v-k en q-k) voor beide klassen. Rechts de toestandsbepaling tot dan toe.

Om te zien of de schatting op basis van de verdeling van weegfactoren goed gaat, worden gedurende de simulatie vier contourplots gebruikt. De assen van de figuren bestaan uit de voorkomende waardes van de parameters die geschat worden. In figuur 6-9 is een voorbeeld te zien waarbij met kleuren wordt aangegeven welke combinaties van waardes hoge weegfactoren veroorzaken en welke lage. Tevens wordt de gekozen en correcte waarde in het figuur getekend. Door het tweedimensionale karakter is dit onderdeel echter alleen bruikbaar als maximaal twee parameters geschat worden.



figuur 6-9 Voorbeeld van de visualisatie van de scores per deeltje per soort metingen en voor de gecombineerd. Het rondje ($kC = 28$, $vC = 76$) geeft de gekozen waarden aan en het vierkantje ($kC = 24.9$, $vC = 78.8$) geeft de juiste waarden aan.

Naast deze hulpmiddelen is het uiteraard interessant wat de bepaalde toestand is aangezien dat het doel is van het filter. Tijdens de simulatie wordt de toestand getoond, maar dit bleek niet mogelijk in een vergelijkbare viewer als voor Fastlane gebruikt wordt. Daarom wordt aan het einde van de simulatie de mogelijkheid geboden om de toestand van de gehele simulatietijd te laten zien in een viewer die qua interface en visualisatie identiek is aan de Fastlane Result viewer.

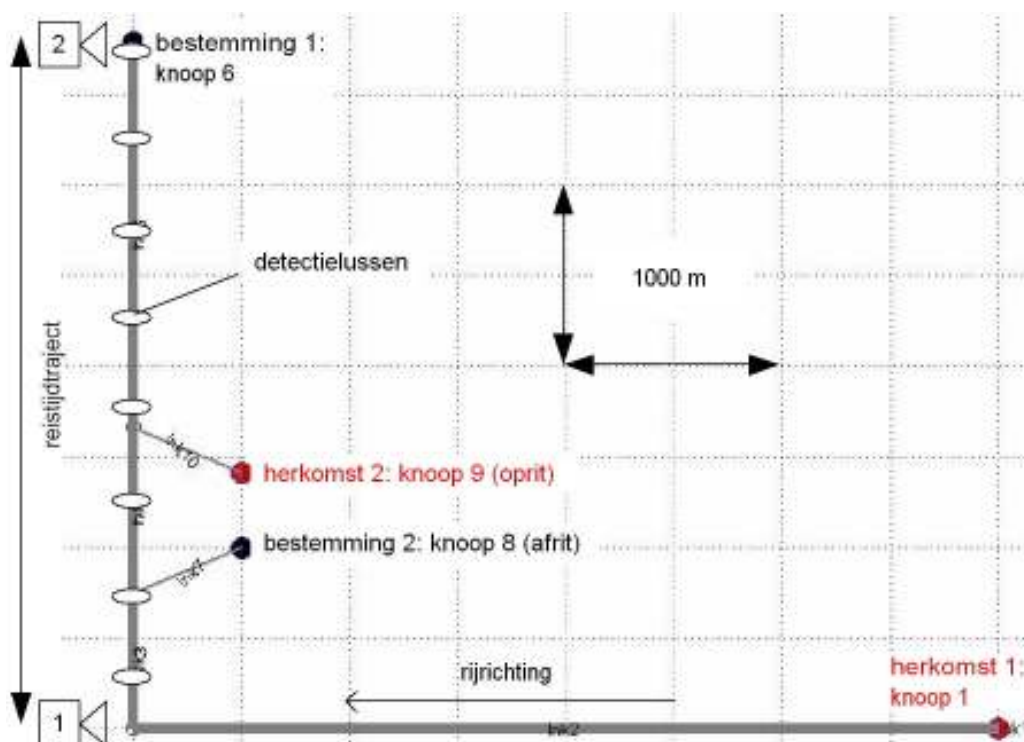
Om te beoordelen of het filter werkt, zijn een drietal soorten testen gebruikt:

1. Weergave van de toestanden wanneer de gebruikte parameters exact hetzelfde zijn als de parameters die gebruikt zijn voor het maken van de synthetische meetdata.
2. Toestandsbepaling door het schatten van parameters: weergave van geschatte parameters en de toestanden waarbij de parameters gedurende simulatie worden geschat. De gebruikte meetdata zijn de verkregen uit simulaties met Fastlane.
3. Toestandsbepaling door het schatten van parameters: weergave van geschatte parameters en de toestanden waarbij de parameters gedurende simulatie worden geschat. De gebruikte meetdata zijn de verkregen uit simulaties met Fastlane waarover een ruis is aangebracht.

De eerste test heeft als doel om te kijken of de algemene opzet van het filter werkt en het op de juiste momenten de juiste veranderingen weergeeft. Ook is het nuttig om te zien of de vertaling van dichtheden per klasse naar snelheden en intensiteiten op een juiste wijze plaatsvindt. Uitgaande van een correcte werking op basis van de resultaten van testsoort 1 zijn de tweede soort testen bedoeld om het vermogen van het filter om de juiste parameterwaarden te benaderen, te beoordelen. De derde soort testen doet hetzelfde als de vorige test, met als verschil dat aan de meetdata ruis is toegevoegd. Dit is namelijk in de werkelijkheid ook het geval: metingen zijn verre van exact.

6.11.1 Netwerk en (synthetische) data

Om de testen uit te kunnen voeren zijn, naast het filter, een netwerk en data (synthetische reistijd-, intensiteiten- en snelheidsmetingen) nodig. Ten behoeve van de inzichtelijkheid is hiervoor nog niet het netwerk uit de casestudie gebruikt. Het gebruikte netwerk is weergegeven in figuur 6-10 met een plot uit Fastlane. Hierbij zijn link 3, 4, en 5 voor het werkelijke testen van het filter. En is de tweede link gebruikt om inzicht te krijgen in hetgeen stroomopwaarts gebeurt.



figuur 6-10 Het testnetwerk met de ligging van de detectielussen, het reistijdtraject en de herkomsten en bestemmingen.

Voor het generen van de synthetische data is Fastlane gebruikt waarbij per minuut de intensiteiten en harmonisch gemiddelde snelheden voor een aantal cellen is bijgehouden. Deze cellen zijn zo gedefinieerd dat de detectielussen ongeveer om de 500 m liggen op een deel van het netwerk. Dit deel betreft de doorgaande links van de hoofdweg (link 3, 4 en 5). Tevens zijn voor hetzelfde traject voor iedere minuut reistijden gegenereerd. Dit houdt dus een lengte van ruim 7 km in. De doorgaande links van de hoofdweg hebben allen drie stroken, terwijl de op- en afrit bestaan uit een enkele strook. Om het model verder te laten werken is de verkeersvraag gedefinieerd: hoeveel voertuigen komen per uur het netwerk binnen gegeven het tijdstip bij de rode punten (knoop 1 en knoop 9). Daarnaast is ook de verdeling van het verkeer over link 4 en link 7 (turnfractie van verkeer naar de afrit bij knoop 8) gegeven. Voor het testen van het filter is uitgegaan van een periode van vier uur: 8:00 – 12:00. In tabel 6-2 staan de waardes die per uur zijn gebruikt. Bij beide testen zijn deze waardes als bekend verondersteld. Net als andere waardes, zoals de lengte van de voertuigen per klasse en de verdeling van voertuigen over beide klassen²⁷.

tabel 6-2 Turnfracties en verkeersvraag per uur gespecificeerd voor de tests.

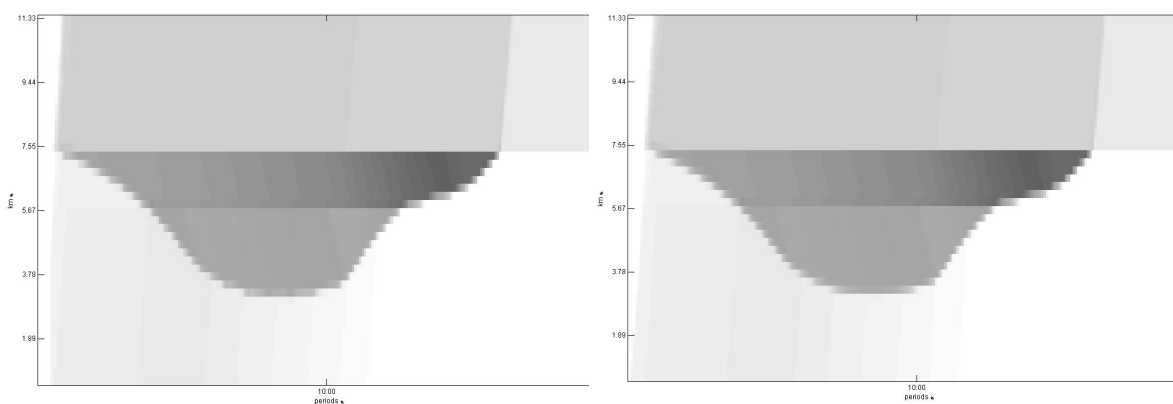
Tijd	Turnfracties (naar knoop 8)	Verkeersvraag (knoop 1, knoop 9)
08:00 – 09:00	0.02	4500, 1000
09:00 – 10:00	0.05	4700, 1100
10:00 – 11:00	0.10	4200, 1300
11:00 – 12:00	0.15	3500, 2000

²⁷ Tenzij de betreffende parameter geschat wordt, zoals in testsoort 2 en 3 zal gebeuren met enkele parameters.

Bij deze verkeersstromen zal na enige tijd de vraag bij de aansluiting van de oprit op het hoofdwegennet groter worden dan de capaciteit. De resulterende file zal zich stroomopwaarts uitbereiden en later afnemen en zelfs geheel verdwijnen.

6.11.2 De resultaten van de testen

Aangezien de gebruikte parameters bij test 1 exact hetzelfde zijn als de parameters bij het genereren van de data, zou de uitkomst moeten zijn dat exact dezelfde toestand wordt bepaald door het filter als de toestand waarop de meetgegevens zijn gebaseerd. In figuur 6-11 staan links de toestanden (snelheid) die geproduceerd zijn door Fastlane bij het genereren van de synthetische data. Rechts is de toestandsbepaling (snelheid) door het filter weergegeven. Zoals te zien is, is het enige verschil het ontbreken/afwijken van de toestanden voor de eerste momenten. Dit komt doordat de eerste reistijdmeting pas in de zesde simulatieminuut beschikbaar komt. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de algemene opzet correct werkt en op de juiste momenten veranderingen oppakt en weergeeft.



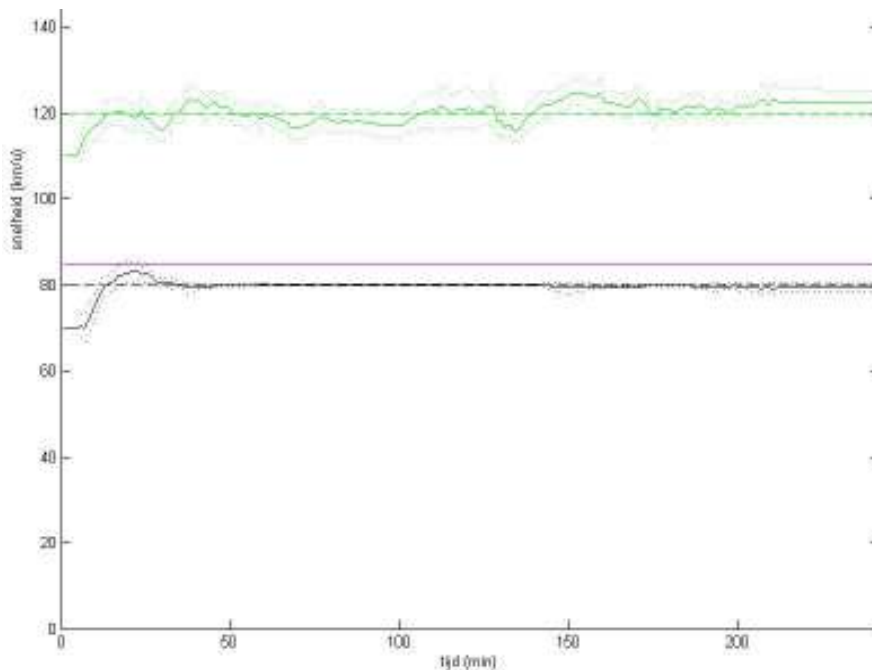
figuur 6-11 Snelheden geproduceerd zijn door Fastlane bij het genereren van de synthetische data (links) en door het filter (rechts). Horizontaal is de tijd uitgezet en verticaal de afstand ten opzichte van de het begin van link 2 in de stroomafwaartse richting.

De tweede soort test moet meer inzicht geven in de mate waarin het filter in staat is de parameters te corrigeren richting de juiste waarde. Zo zijn parameters vaak niet exact bekend en zullen geschat moeten worden. Om het functioneren van deze schatting te bekijken zijn verschillende testruns gedaan waarbij dezelfde data als bij test 1 is gebruikt. Het verschil is dat enkele parameters een verkeerde beginwaarde hebben gekregen en gedurende de simulatie geschat worden. Aangezien het een tijdrovend proces is en het niet inzichtelijk wordt wanneer alle parameters tegelijk geschat worden zijn twee subtesten gedaan:

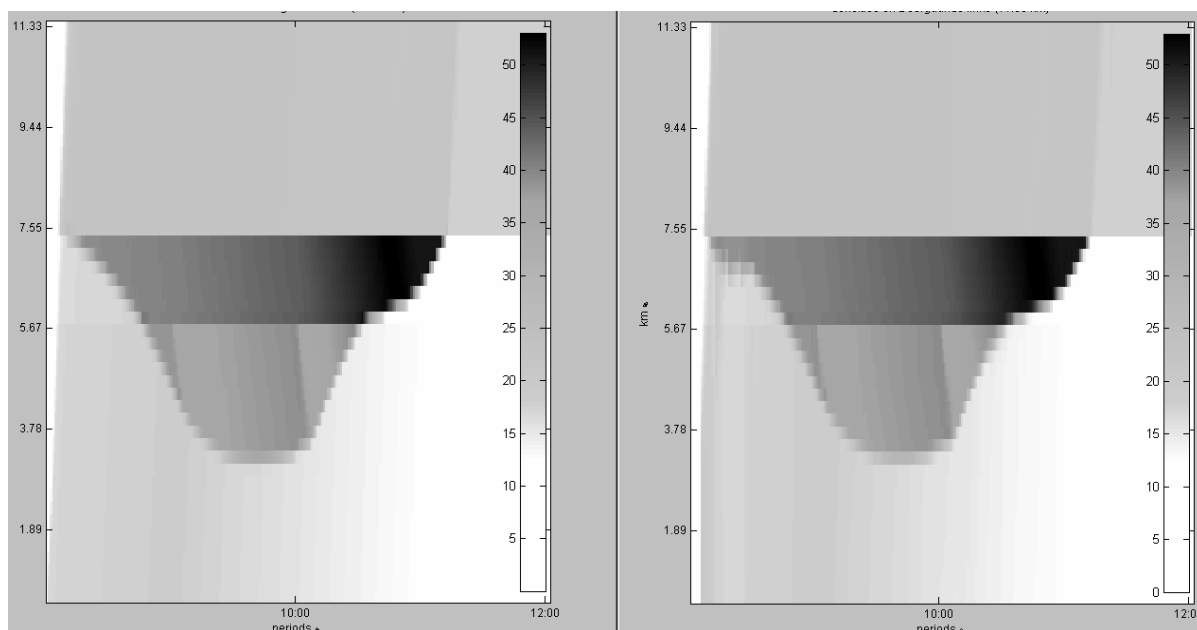
- Test 2a: schatting van de kritische snelheid en de snelheid bij vrije afwikkeling voor gebruikersklasse 1, waarbij per parameter 5 waardes per filterstap mogelijk zijn en dus 25 deeltjes per filterstap worden gecreëerd,
- Test 2b: schatting van de kritische dichtheid, de stremmingdichtheid en de vrije snelheid van gebruikersklasse 2, waarbij per parameter 7 waardes per filterstap mogelijk zijn en dus 343 deeltjes per filterstap worden gecreëerd.

Voor beide testten worden alle beschikbare metingen gebruikt, zowel uit meetlussen als de reistijdcamera's. Bij de beoordeling van de testten draait het om de mate waarin de betreffende parameters convergeren naar de juiste waarde en de toestandsbepaling.

Voor test 2a is hieronder de ontwikkeling van beide parameters weergegeven (figuur 6-12). Daarna vergelijkt figuur 6-13 de dichtheiden gedurende simulatie op het doorgaande traject met de uitkomst van Fastlane.



figuur 6-12 Ontwikkeling van de schatting van de parameters: snelheid van klasse 1 bij vrije afwikkeling (bovenste, groen) en de kritische snelheid (onderste, zwart) ten opzichte van de werkelijke waarden (onderbroken lijnen). Tevens is de vaste parameterwaarde voor de snelheid van klasse 2 bij vrije afwikkeling te zien (midden, paars).



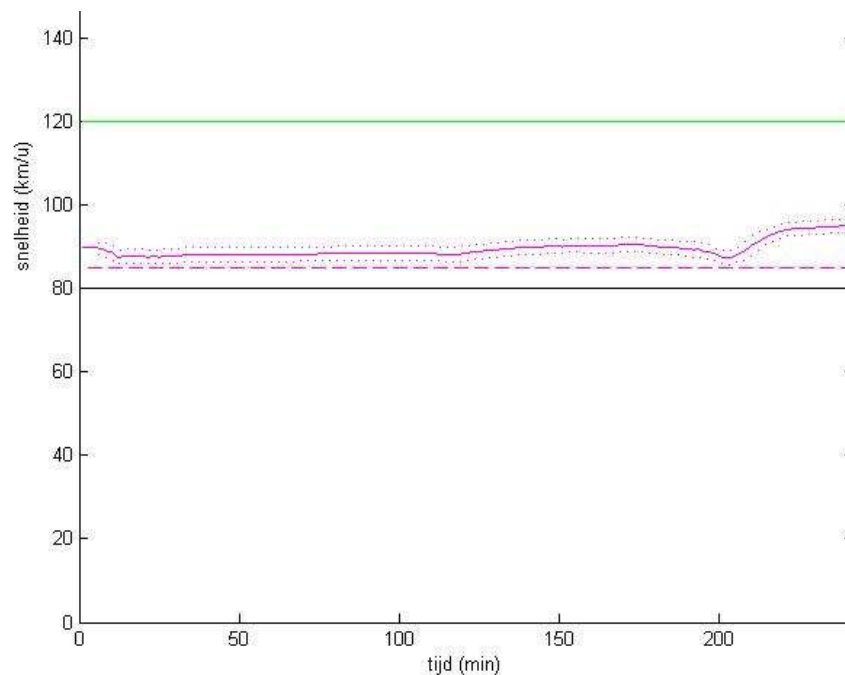
figuur 6-13 Screenshots van dichtheidplots op doorgaande hoofdweg van Fastlane simulatie om metingen te genereren (links) en van de bepaling door het filter (rechts).

De parameter voor de kritische snelheid convergeert zeer goed. Voor de andere parameter (snelheid bij vrije afwikkeling voor gebruikersklasse 1) lijkt het convergeren minder goed te voorlopen. Hoewel in grote lijnen de juiste waarde wel wordt benaderd, blijven schommelingen en lokale afwijkingen optreden. Aan het begin en aan het einde van de schatting lijkt het wel goed te gaan. Dit kan verklaard worden doordat in de periode met schommelingen vooral een congestieve situatie optreedt in het traject waarvan metingen beschikbaar zijn (vanaf 4 km tot einde). Zodoende is de vrije

afwikkelingsparameter slecht te schatten omdat de bijbehorende situatie niet optreedt bij de detectorlocaties.

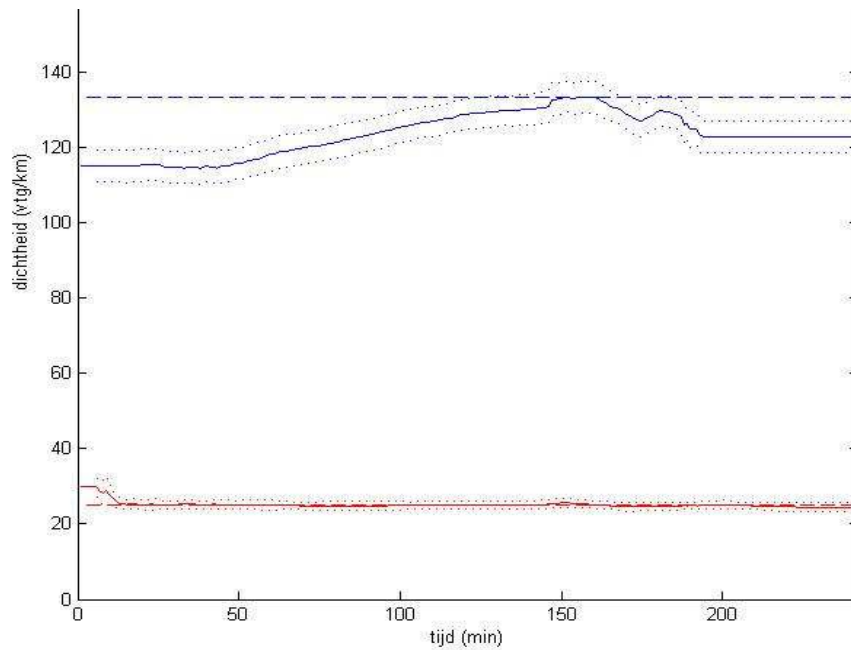
De bepaling van de toestand laat zien dat de uitkomst van het filter goed overeenkomt met "de werkelijkheid" van Fastlane. Bij de overgang van vrije afwikkeling naar congestie is de scheiding minder scherp. Tevens is de toestandsbepaling in het begin van de simulatie rond km 7 niet erg goed. Dit is te verklaren door het bewust te laag definiëren van de startwaarden van de parameters.

Ondanks het grotere aantal deeltjes (per parameter én in totaal) zijn de resultaten van test 2b minder goed. Dit geldt vooral voor de schatting van de parameters. De schatting van de snelheid voor gebruikersklasse 2 bij vrije afwikkeling wordt getoond in figuur 6-14. Te zien is dat de waarde slecht wordt benaderd wat verklaard kan worden door dezelfde reden als bij test 2a voor klasse 1. Tevens moet worden bedacht dat het aandeel van klasse 2 veel lager is en daardoor de invloed op de metingen ook minder is.

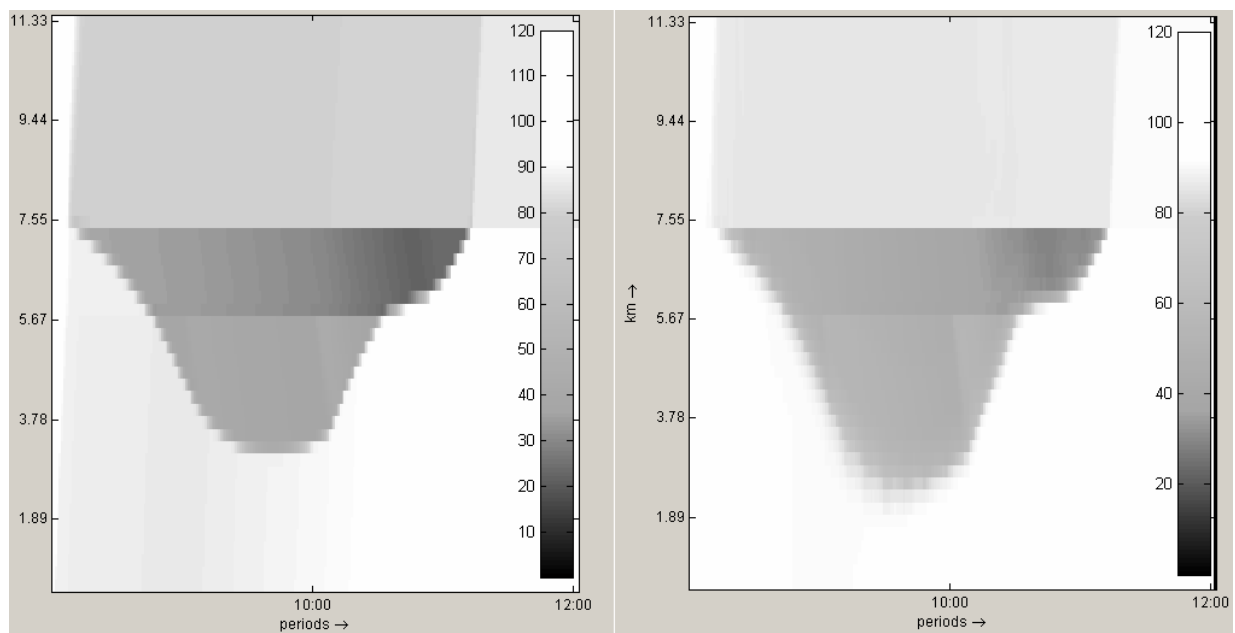


figuur 6-14 Ontwikkeling van de schatting de snelheidsparameter van klasse 2 bij vrije afwikkeling (midden, paars) ten opzichte van de werkelijke waardes (onderbroken lijn). Tevens zijn de vaste parameterwaardes voor de snelheid van klasse 1 bij vrije afwikkeling (bovenste, groen) en de kritische snelheid (onderste, zwart) te zien.

In figuur 6-15 is te zien dat ook bij deze test de parameters die horen bij de optredende situatie veel beter worden geschat. Zo convergeert de kritische dichtheid snel en blijft heel nauwkeurig de juiste waarde houden. De dichtheid waarbij het verkeer tot stilstand komt, wordt echter veel minder goed geschat. Deze parameter convergeert alleen gedurende de periode dat de snelheden laag zijn (zie figuur 6-16 rechts).



figuur 6-15 Ontwikkeling van de schatting van de parameters: stremmingdichtheid (bovenste, blauw) en de kritische dichtheid (onderste, rood) ten opzichte van de werkelijke waarden (onderbroken lijnen).



figuur 6-16 Screenshots van snelheidplots op doorgaande hoofdweg gedurende Fastlane simulatie om metingen te genereren (links) en van de bepaling door het filter (rechts).

Wanneer de toestandsbepaling door het filter wordt vergeleken met "de werkelijkheid" (figuur 6-16 links) valt op dat de snelheden minder goed zijn. Zowel de waarden als de vorm wijken licht af. Een verbetering ten opzichte van de toestandsbepaling van test 2a is dat de snelheden in het begin van de simulatie rond km 7 wel kloppen, de snelheden van congestieve deel net voor tien uur zijn echter veel slechter. Dit kan komen doordat er twee parameterwaarden zijn op dat moment die (nog) niet de juiste waarden hebben.

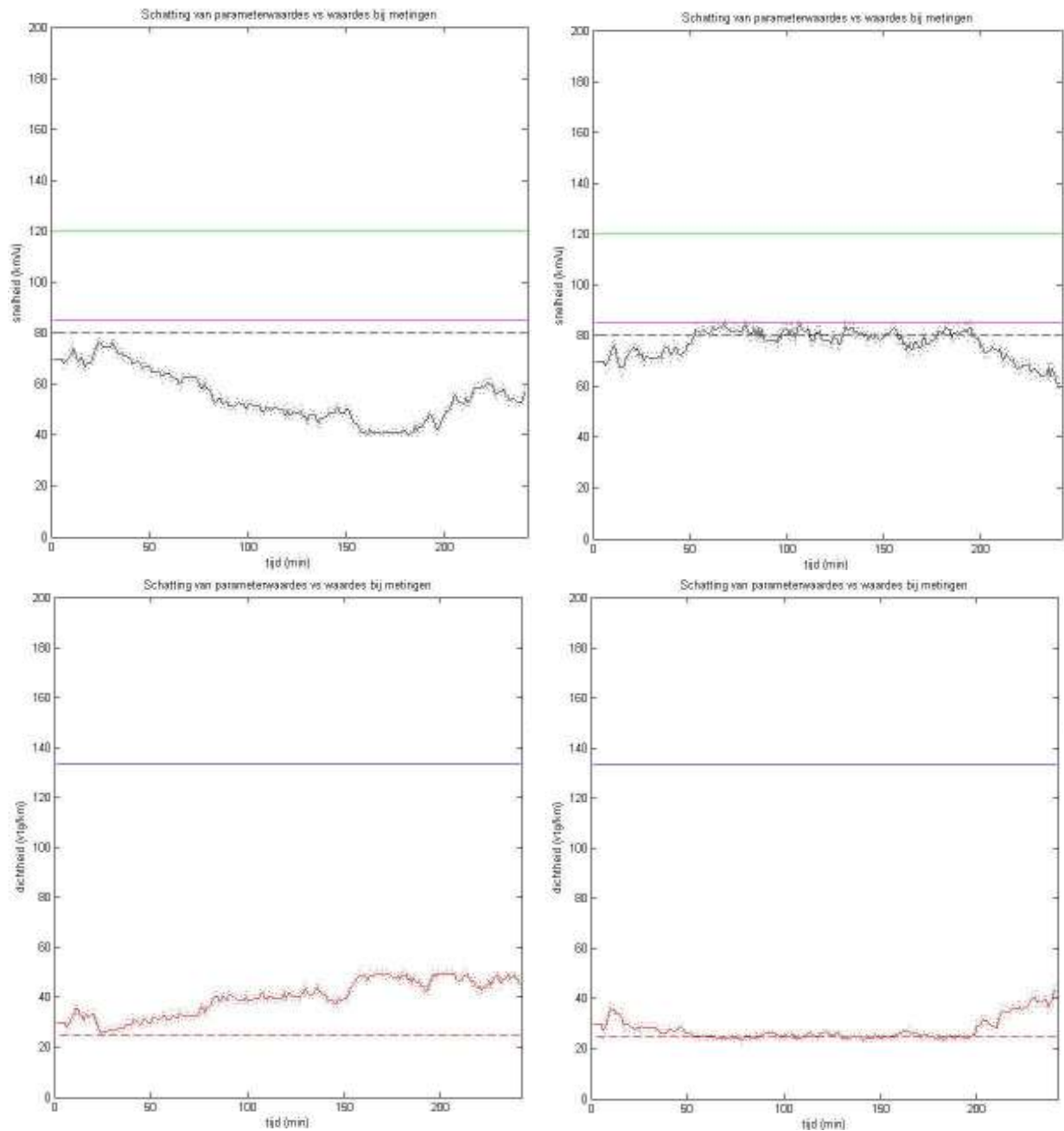
Tot slot is een serie testen (test 3) uitgevoerd om het kijken of het filter eveneens goed presteert wanneer geen exacte meetdata gebruikt worden, maar een ruiscomponent is toegevoegd. Dit is het enige verschil met de tweede soort testen zoals hiervoor is besproken. Het doel is eveneens om meer inzicht te krijgen in de mate waarin het filter in staat is de parameters te corrigeren richting de juiste waarde. Voor details over het toevoegen van ruis en de gevolgen voor de weegfactoren wordt verwezen naar de uitleg in subparagraaf 7.1.3. Hier worden slechts op de gevolgen voor de werking en het presteren van parameterschatting en toestandsbepaling ingegaan.

Er zijn testen uitgevoerd om ook andere conclusies te kunnen trekken. Zo is namelijk aan de hand van de resultaten van testsoort de vraag behandeld of het niet mogelijk is om het aantal deeltjes per parameter te verlagen van vijf naar drie. Ook is het interessant om te weten te komen wat een goede combinatie van parameters is die geschat worden. Het is ondoenlijk om alle mogelijkheden te onderzoeken, maar door verschillende combinaties te gebruiken is wellicht meer inzicht te verkrijgen. In deze paragraaf worden in dit kader de meest interessante resultaten getoond, te weten:

- Test 3a: schatting van de kritische snelheid en kritische dichtheid, waarbij per parameter drie waardes per filterstap mogelijk zijn en dus negen deeltjes per filterstap worden gecreëerd,
- Test 3b: schatting van de kritische snelheid en kritische dichtheid, waarbij per parameter vijf waardes per filterstap mogelijk zijn en dus 25 deeltjes per filterstap worden gecreëerd,
- Test 3c: schatting van de kritische snelheid, kritische dichtheid en de snelheid bij vrije afwikkeling voor gebruikersklasse 1, waarbij per parameter vijf waardes per filterstap mogelijk zijn en dus 125 deeltjes per filterstap worden gecreëerd,
- Test 3d: schatting van de kritische snelheid, kritische dichtheid, de snelheid bij vrije afwikkeling voor gebruikersklasse 1 en de stremmingsdichtheid, waarbij per parameter vijf waardes per filterstap mogelijk zijn en dus 625 deeltjes per filterstap worden gecreëerd.

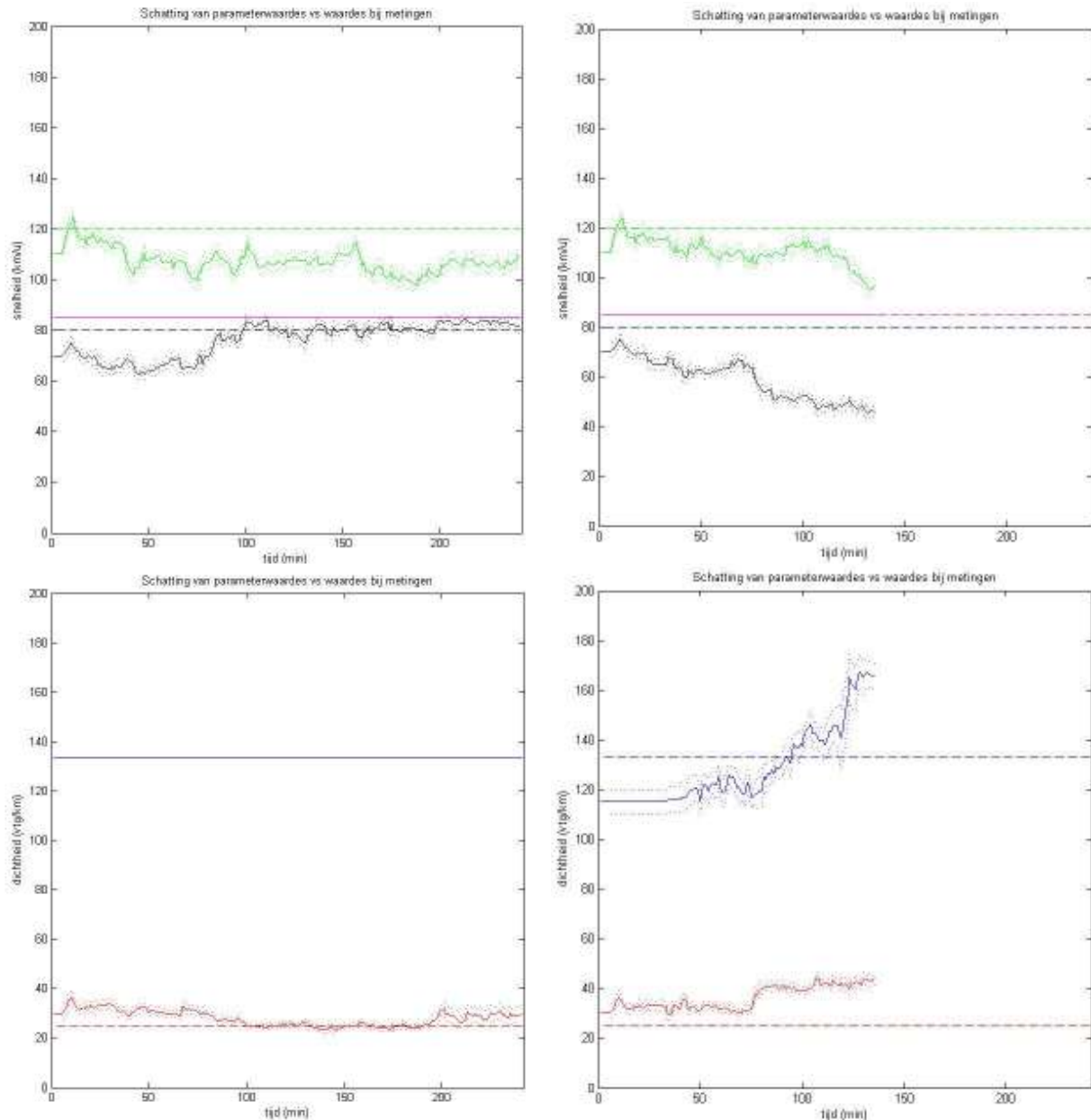
Om te voorkomen dat deze subparagraaf een ellenlange stuk van figuren met korte toelichting wordt, zijn slechts die resultaten gegeven die belangrijke verschillen vertonen met andere testen. Voor alle resultaten wordt verwezen naar bijlage 4.

In figuur 6-17 is duidelijk te zien dat het een groot verschil is of er drie of vijf waardes per parameter gebruikt worden. De benadering van de correcte parameterwaardes vindt bij test 3a (links) aanmerkelijk minder goed plaats dan bij test 3b het geval is.



figuur 6-17 Duidelijk verschil bij het schatten van de parameters bij test 3a en 3b voor de kritische snelheid (bovenste twee plots) en de kritische dichtheid (onderste twee plots) met 3 (linker plots) en 5 waarden per parameter (rechter plots).

Test 3c wijst uit dat het mogelijk is om voor het betreffende netwerk een redelijk goede parameterschatting en toestandsbepaling uit te voeren binnen een tijdsbestek van vier uur. Dit laatste is belangrijk omdat het simuleren voor een real-time toepassing niet langer mag duren dan de tijd waar de simulatie betrekking op heeft. Zoals in figuur 6-18-links te zien is worden de waarde van de snelheid bij vrije afwikkeling voor klasse 1 niet geheel goed geschat. De waarde lijkt wel te convergeren, hetzij rondom een verkeerde waarde, maar het effect op de toestandsbepaling lijkt beperkt te zijn (zie bijlage 4).



figuur 6-18 De parameters van test 3c (linker twee plots) worden aanzienlijk beter geschat dan het eerste deel van test 3d (rechter twee plots).

Test 3d daarentegen laat een aanzienlijk minder positief resultaat zien. De schattingen van de parameterwaardes convergeren niet en nemen totaal verkeerde waardes aan. Aangezien de simulatie erg veel tijd²⁸ in beslag neemt, is het schatten van vier parameterwaardes tegelijk geen optie (dat is ook de reden dat het voorbeeld in figuur 6-18-rechts niet voltooid is). Dit is gebaseerd op het gebruik van minimaal vijf verschillende waardes per parameter. Zoals ook al uit test 3a is gebleken is het niet mogelijk om een goede schatting uit te voeren met minder waardes per parameter. Mogelijk zou gebruik van meer waardes per parameter, bijvoorbeeld 7, de doorrekeningstijd nog langer maken.

²⁸ Bij het gebruikte netwerk is dit meer dan 15 uur.

6.11.3 Conclusie verificatie en mogelijk te schatten parameters

Geconcludeerd kan worden dat het model valide is mits de juiste parameterwaardes geschat worden. Zelfs met ruis op de data is het filter in staat een redelijke toestandsbepaling te doen. En worden de opbouw en afbouw van de congestie goed opgepakt.

Dit is wel afhankelijk van de parameters die geschat worden. Zeker wanneer parameters geschat worden die invloed hebben op de optredende verkeerssituaties reageert het filter goed en nauwkeurig. Maar wanneer bijvoorbeeld de stremmingsdichtheid wordt geschat en er weinig congestie ontstaat is de kans groot dat deze slecht geschat wordt, wat een negatief gevolg heeft voor de toestandsbepaling.

Aangezien per parameter minimaal vijf waardes gebruikt worden is het niet praktisch om alle parameters gelijktijdig te variëren. Dit zou namelijk leiden tot een groot aantal deeltjes wanneer alle combinaties toegepast worden. Op basis van de verificatietesten is het dus aan te raden om een keuze te maken van parametercombinaties.

De aanleiding voor dit onderzoek geeft al aan dat men vaak niet van tevoren weet wat de exacte verkeersontwikkeling is en daarom de ideale keuze van de te schatten parameters moeilijk te maken is. Daarom is het belangrijk dat op zijn minst een set van te schatten parameters wordt gekozen die invloed heeft op elke verkeerssituatie. In tabel 6-3 is per parameter weergegeven of deze betrekking heeft op de vrije afwikkeling en/of de congestieve tak van het fundamenteel diagram, zie ook subparagraaf 4.1.

tabel 6-3 Verkeerssituaties waarop de parameters van het FD betrekking hebben.

Parameter	Vrije afwikkeling	Congestie
Snelheid bij vrije afwikkeling (1)	ja	nee
Snelheid bij vrije afwikkeling (2)	ja	nee
Kritische snelheid	ja	ja
Kritische dichtheid	ja	ja
Stremmingdichtheid	nee	ja

In de tabel is te zien dat de kritische dichtheid en kritische snelheid op beide situaties invloed hebben. Het is dus sterk aan te raden om minstens één of beide parameters te schatten. In wezen zou het dus voldoende zijn om deze twee parameters te gebruiken. De kans bestaat echter dat deze waardes elkaar opheffen bij gebruik van andere meetdata aangezien het product de capaciteit is. Een voorbeeld hiervan is te zien in de volgende paragraaf.

Maar wellicht kan het nuttig zijn om ook nog andere parameters te schatten omdat deze in werkelijkheid gemakkelijk fluctueren en/of het moeilijk is om de juiste waarde van te stellen. Een voorbeeld hiervan is het aandeel vrachtverkeer, de invloed is zeer groot. Helaas lukt het niet om het aandeel vrachtverkeer correct te schatten.

Een belangrijk aspect dat een rol speelt bij het schatten van de parameters is dat de toestand wel moet optreden. Zo is het schatten van de stremmingsdichtheid alleen mogelijk wanneer zeker is dat congestie optreedt. Anders zal de invloed van de waarde van deze parameter beperkt blijven en is de juiste waarde ook slecht te schatten. Toch is het interessant om deze te schatten aangezien de snelheid van schokgolven, zie subparagraaf 4.1, in belangrijke mate wordt bepaald door de waarde van deze parameter. De invloed van de snelheid bij vrije afwikkeling voor het vrachtverkeer is waarschijnlijk nog beperkter. Het aandeel voertuigen uit deze klasse is aanzienlijk lager dan het aandeel personenauto's. Ook is de waarde waarschijnlijk vrij constant rondom de maximale toegestane snelheid, onder meer door relatief strenge controles en regelgeving.

Test 3 laat duidelijk zien dat het aan te bevelen is om op zijn minst vijf verschillende waardes per parameter te gebruiken. Dit zou betekenen dat per filterstap minimaal 125 verkeersontwikkelingen doorgerekend moeten worden wanneer drie parameters geschat zouden worden en 625 bij vier te schatten parameters. Zoals ook aan het einde van de vorige subparagraaf is genoemd is het ondoenlijk met het oog op de rekentijd²⁹ dit te gebruiken bij een real-time toestandsbepaling.

²⁹ Zelfs een computer met een snelle processor en voldoende geheugen heeft problemen om dit in één minuut door te rekenen. Zeker wanneer het netwerk groter wordt en meer (reistijd)metingen gebruikt zouden worden.

Op basis hiervan wordt aangeraden om de volgende combinaties mee te nemen bij het testen voor de casesituatie:

1. De kritische snelheid & de kritische dichtheid,
2. De kritische snelheid, de kritische dichtheid & de snelheid van gebruikersklasse 1 bij vrije afwikkeling,
3. De kritische snelheid, de stremmingsdichtheid & de snelheid van gebruikersklasse 1 bij vrije afwikkeling,
4. De kritische dichtheid, de stremmingsdichtheid & de snelheid van gebruikersklasse 1 bij vrije afwikkeling.

In de volgende paragraaf zullen hierop nog enkele aanpassingen gedaan worden op basis van de ervaringen bij het testen met het complexe A13-netwerk.

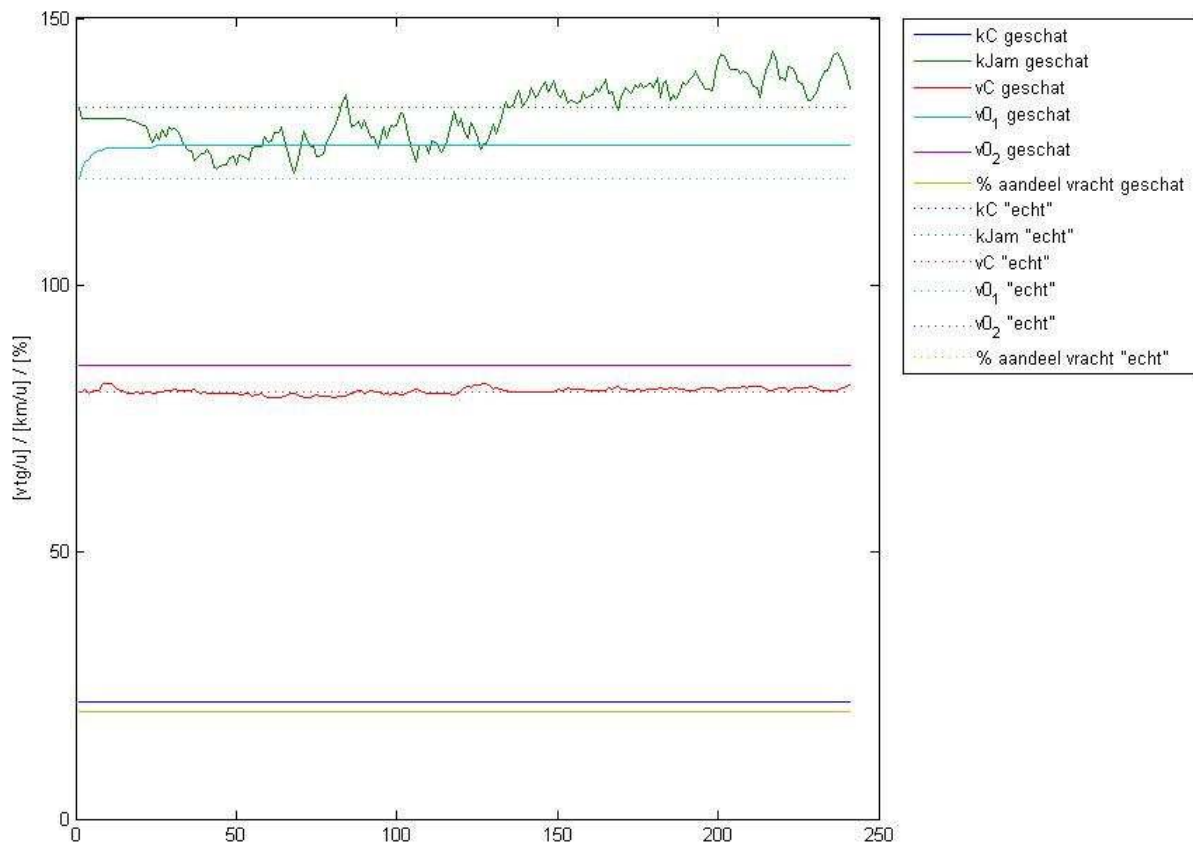
6.12 Verificatie algoritme met netwerk A13

Ondanks de positieve resultaten uit de vorige paragraaf blijkt het presteren bij gebruik van het netwerk uit de casestudie (A13) teleurstellend. Zoals ook in paragraaf 7.1 te lezen is bestaat dit netwerk uit een aantal links met verschillende maximale snelheden. Daarnaast is gebruik gemaakt van een ander verkeersmodel om de synthetische data te genereren, zie ook subparagraaf 7.1.2. Bij gebruik van de data uit dit microscopische model zijn een aantal parametercombinaties zoals voorgesteld aan het einde van de vorige paragraaf blijkbaar minder bruikbaar dan verwacht. Tevens zijn er twee in plaats van één bottlenecks aanwezig. In de volgende subparagrafen wordt per aspect een toelichting gegeven.

6.12.1 Verschillende maximale snelheden

Het verschil in maximale snelheden zorgt er voor dat het niet meer mogelijk is om één waarde voor het hele netwerk te gebruiken als het gaat om de snelheid bij vrije afwikkeling. Deze waarde wordt immers begrensd door de geldende maximale snelheid. Daarom is voorafgaand aan de testen in het volgende hoofdstuk een aanpassing gedaan aan het filter. Zo wordt niet de absolute waarde van de snelheid geschat, maar de waarde + of – de startwaarde.

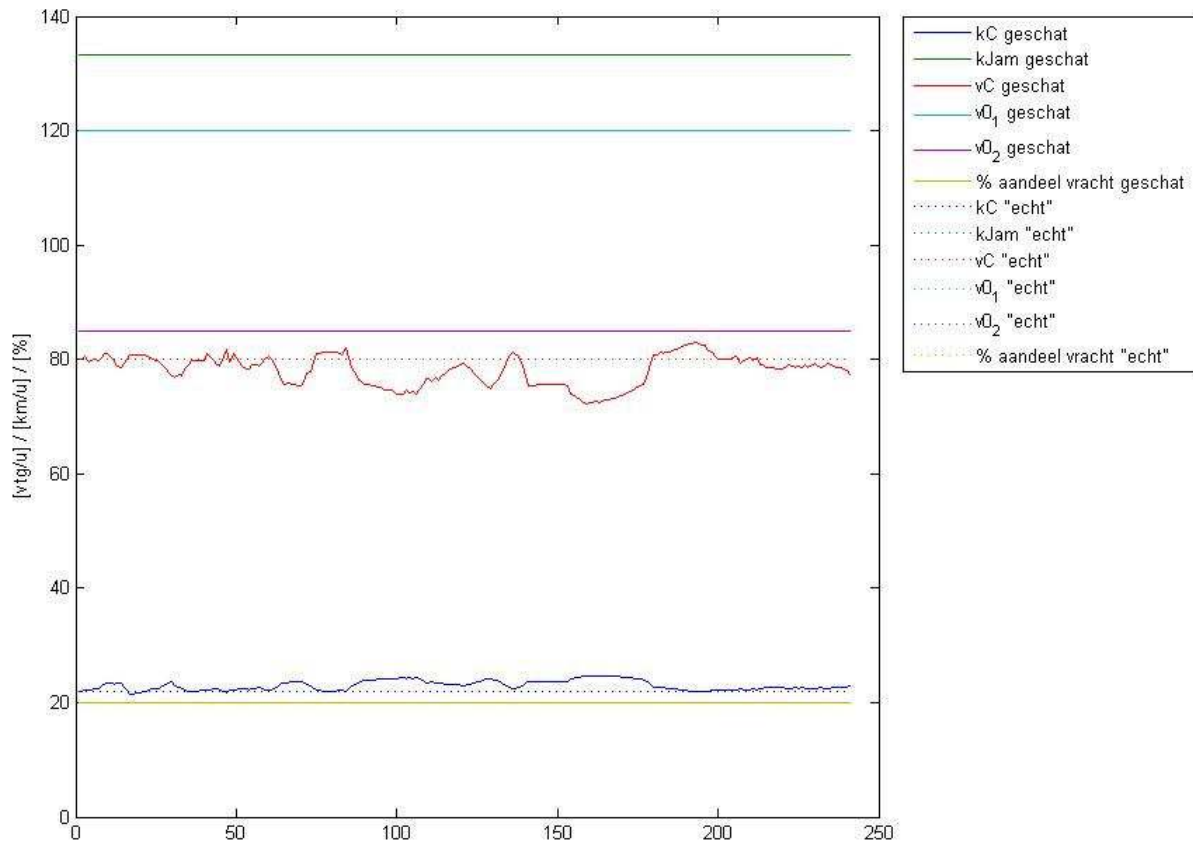
Ook het verkeersmodel waarmee de synthetische data wordt gegenereerd, heeft een bepaalde wijze hoe wordt omgegaan met maximale snelheden. Een belangrijk aspect is dat het gebruikte model (FOSIM) er van uit gaat dat de voertuigen zich niet netjes aan de maximale snelheden houden, net zoals in werkelijkheid het geval is. In ieder geval heeft een deel van de vijf gebruikersklassen een hogere gewenste snelheid dan de maximale snelheid. Dit is ook de reden dat de waarde voor de extra bijdrage van de snelheid convergeert naar een waarde die boven de nul ligt. In figuur 6-19 is de schatting van de snelheid weergegeven ten opzichte van een referentiewaarde van 120 km/uur. Aangezien Fastlane er van uit gaat dat de maximale snelheden niet overschreden worden, is het dus aan te raden om de vrije snelheden met 5 a 10 km/u te verhogen wanneer deze niet wordt geschat.



figuur 6-19 De schatting van de parameterwaardes voor de stemmingsdichtheid, de snelheid bij vrije afwikkeling van klasse 1, en de kritische snelheid (doorgetrokken lijnen) ten opzichte van de referentiewaardes (gestippelde lijnen) gedurende 240 minuten.

6.12.2 Mogelijke parametercombinaties

Naar aanleiding van de testen bij de verificatie met het eenvoudige testnetwerk werd geconcludeerd dat het mogelijk was om de twee parameters die samen de capaciteit bepalen tegelijk te schatten. Op basis van testen met als netwerk de meer complexe A13 is echter een andere conclusie te trekken. Zoals te zien is in figuur 6-20 heffen beide parameters elkaars fouten op. Het schatten van beide parameters op hetzelfde moment is dus af te raden. Zeker wanneer dit wordt vergeleken met de geschatte waarde voor de kritische snelheid in figuur 6-19.



figuur 6-20 De schatting van de parameterwaardes voor de kritische snelheid en de kritische dichtheid (doorgetrokken lijnen) ten opzichte van de waardes bij het creëren van de synthetische data met Fastlane (gestippelde lijnen) gedurende 240 minuten.

6.12.3 Bottlenecks

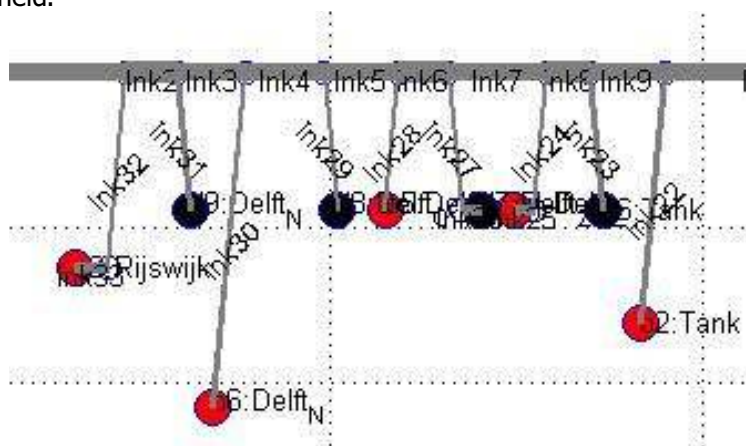
Zoals ook al in subparagraaf 6.3.1 is toegelicht, heeft de locatie en het aantal potentiële bottlenecklocaties invloed op de wijze waarop de parameters geschat moeten worden. De verkeersafwikkeling van de verkeersmodellen FOSIM en Fastlane rondom het capaciteitspunt verschillen erg. Zo gaat FOSIM wel uit van een capaciteitsval, terwijl Fastlane hier geen rekening mee houdt. Het filter reageert hierop door het fundamentele diagram aan te passen naar een lagere capaciteit. Wanneer één fundamenteel diagram wordt gebruikt voor het gehele netwerk betekent dit dat ook op andere potentiële bottlenecklocaties onterecht of veel te vroeg congestie ontstaat.

Ook de criteria voor een potentiële bottlenecklocatie verschillen tussen beide verkeersmodellen. Bij 1^e orde modellen (zie paragraaf 4.4) wordt een bottleneck enkel en alleen veroorzaakt doordat de vraag groter is dan de capaciteit. Dit kan komen doordat de vraag toeneemt gedurende de tijd, maar ook bij een overgang van de ene naar de andere link. Een voor zich sprekend geval is wanneer een oprit zorgt voor extra verkeer, maar ook een strook minder kan een bottleneck verzorgen. De omgang per verkeersmodel verschilt. Bij 1^e orde macroscopische modellen is de locatie van de kop van de file exact op de overgang tussen de twee links en begint zodra de vraag groter is dan de capaciteit. Maar bij FOSIM ontstaat de bottleneck meer stroomafwaarts en is het moment van ontstaan veel minder nauwkeurig te zeggen door het stochastische karakter.

Een interessant voorbeeld is de omgang met weefstroken, een gecombineerde invoeg- en uitvoegstrook, tussen een oprit en afrit. FOSIM gaat er van uit dat een deel van de gebruikers de weefstrook gebruiken voor het in- en uitvoegen. Bij Fastlane kan dit onderscheid in stroken echter niet gemaakt worden en is het de vraag welke waarde voor het aantal stroken gebruikt moet worden. Wanneer alleen het aantal doorgaande stroken wordt gebruikt, wordt een deel van de werkelijke capaciteit genegeerd en ontstaat wellicht congestie stroomopwaarts van het begin van de link. Aan de andere kant wordt bij het definiëren van een extra strook de capaciteit overschat en ontstaat een bottleneck aan het eind van de betreffende link bij het beëindigen van de weefstrook. Zoals in

subparagraaf 7.1.1 te zien is, is gekozen om bij weefstroken een waarde van 0,5 te kiezen per weefstrook.

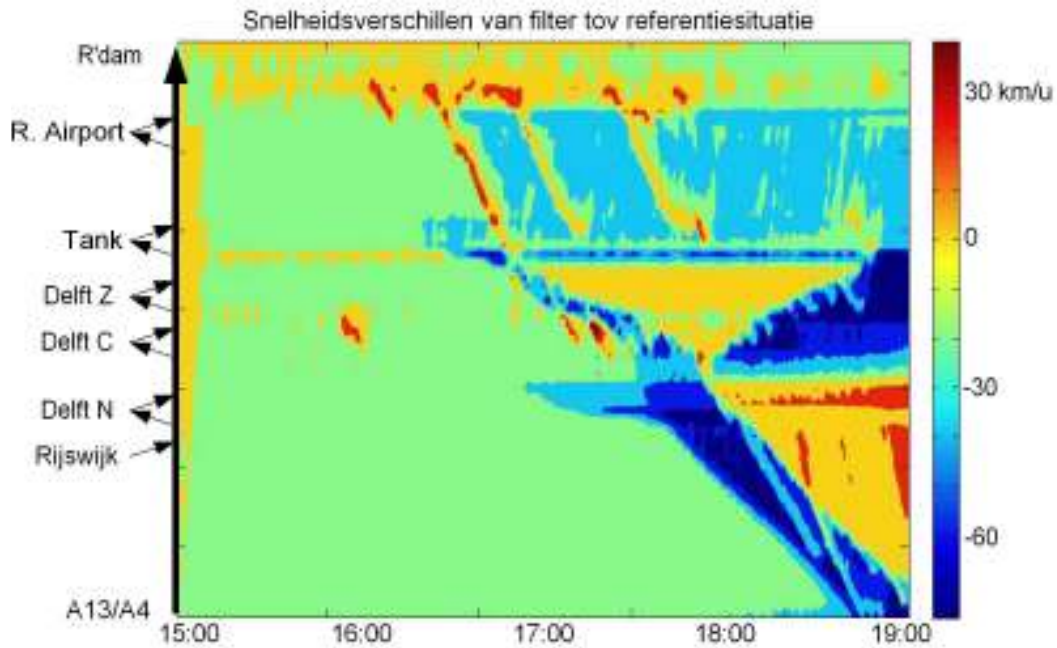
Door de verschillende benaderingen van bottlenecks is het mogelijk dat de capaciteitsval op een deel van het netwerk zorgt voor het ontbreken van congestie rondom andere oprit en overgangen in wegdoorneden. Dit zorgt voor een zeer slechte bepaling van de toestand. Zeker wanneer de vraag relatief dicht in de buurt van de capaciteit komt op verschillende plaatsen in het netwerk. Zoals in subparagraaf 6.3.1 is dit het geval bij het testen met het A13 netwerk. Daarom wordt aanbevolen om het netwerk op te delen in twee deelnetwerken. Per deelnetwerk wordt één verschillende parameter gebruikt met betrekking op de capaciteit. Dit betekent de kritische dichtheid of de kritische snelheid.



figuur 6-21 Detail van netwerk met verschillende links en overgangen in aantal stroken, op- en afritten waardoor er veel potentiële bottlenecks zijn.

De vraag blijft alleen waar de grens tussen de deelnetwerken wordt gelegd. Door de eigenschappen van een 1^e orde model met betrekking tot bottlenecks vormt de grens zelf namelijk ook een bottleneck. In het geval van de testen in de volgende twee hoofdstukken is hiermee rekening gehouden. Hoewel de grens tussen de twee congestie gebieden halverwege een link 4 (zie figuur 6-21) ligt is dit niet als grens gekozen. De oprit bij Delft Noord zorgt dat de vraag op deze link vrij dicht bij de capaciteit (voordat de capaciteitsval is ingetreden) ligt. Het is ook een slechte optie om de grens daarom stroomafwaarts tussen link 3 en link 4 te leggen. Voor beide gevallen zou de congestie veel te vroeg beginnen doordat de capaciteit (een gedeelte) link 4 tengevolge van het aanpassen op de capaciteitsval van de eerste bottleneck te laag zou worden. Daarom is gekozen om de grens tussen de twee deelnetwerken bij de knoop tussen link 4 en link 5 te leggen. Door de afrit naar Delft Centrum is een deel van het verkeer afgeslagen en de vraag op link 5 lager dan op link 4 en ontstaat geen extra bottleneck.

Het gevolg is wel dat de congestie van de eerste bottleneck relatief vroeg het tweede deelnetwerk binnentreedt. Hierdoor ontstaat alsnog de neiging bij het filter om ook voor het tweede deelnetwerk de capaciteit te verlagen. Dit is echter aanzienlijk later dan bij andere liggingen van de grens en levert meer realistische toestandsbepalingen op.



figuur 6-22 Verschilplot bepaalde snelheden en werkelijke snelheden. De toestandsbepaling gedurende congesties is goed, alleen begint congestie 2 te vroeg en gaat de eerste congestie te lang door.

In figuur 6-22 is een verschilplot te zien tussen de toestand van de meetsituatie en de toestandsbepaling door het filter. Dit laat zien dat de snelheid waarmee de congestie in deelnetwerk 2 terugslaat zeer realistisch is alleen verschoven over een afstand van 20 minuten. De hellingen van de schokgolven (zie subparagraaf 4.1) zijn immers vergelijkbaar. De oorzaak voor de translatie hiervoor ligt dus in het feit dat de vraag op veel links zeer dicht bij de capaciteit ligt en de keuze voor de ligging van de grens tussen de deelnetwerken.

Een ander opvallend aspect is dat de congestie naar aanleiding van bottleneck 1 veel te lang duurt. Blijkbaar is het filter niet in staat om het einde van de congestie op te pakken. Bij een 1^e orde model betekent dit dat de vraag groter is dan de capaciteit. De capaciteit is nog steeds erg laag om de capaciteitsval te corrigeren, terwijl de vraag op de randen van het netwerk nog steeds erg hoog is.

Het verschil in vrije snelheden wordt wellicht verklaard door de verschillende wijze waarop met de maximumsnelheid wordt omgegaan bij beide verkeersmodellen. Dit verschilt per model en wellicht bij FOSIM ook wel per gebruikersklasse.

6.12.4 Welke parametercombinaties schatten bij testen A13

Op basis van de voorgaande subparagrafen is aangetoond dat het onverstandig is om de testen in de komende hoofdstukken uit te voeren met parameters zoals voorgesteld in paragraaf 6.11. Twee daarvan vallen af omdat deze tegelijkertijd de kritische dichtheid en de kritische snelheid schatten. Daarnaast vereist het ontbreken van de capaciteitsval in het verkeersmodel Fastlane dat het netwerk³⁰ wordt opgedeeld in twee deelnetwerken met ieder een eigen parameterwaarde die betrekking heeft op de capaciteit. Gezien de goede resultaten bij enkele testen wordt gekozen voor de kritische snelheid.

Aangezien de vereiste rekentijd het niet toelaat om meer dan drie parameters te schatten is het bij dit netwerk mogelijk om nog één andere parameter te schatten. Hiervoor kan gekozen worden uit de snelheid bij vrije afwikkeling van klasse 1 of de stremmingsdichtheid. Zoals de naam als zegt heeft de snelheid bij vrije afwikkeling betrekking of verkeersomstandigheden waarbij geen congestie is opgetreden. Ook door de wijze waarop wordt omgegaan met de maximale snelheid pleit voor het gebruik van deze parameter, zie subparagraaf 6.12.1. Bij toestandsbepaling is men echter meer

³⁰ Helaas zorgt deze handmatige opdeling er voor dat het model minder generiek wordt. De locatie van de grens is immers afhankelijk van het optredende verkeersbeeld.

geïnteresseerd in de congestieve verschijnselen, zoals de filelengte en de snelheden in de file. De stremmingsdichtheid heeft hierop een grote invloed doordat het de snelheid van de schokgolf bepaald. Daarom zullen de testen in de komende hoofdstukken uitgevoerd worden door het schatten van de kritische snelheden per deelnetwerk en de stremmingsdichtheid voor het gehele netwerk. Om het "te hard rijden" op te vangen worden de maximumsnelheden verhoogd met 10 km/uur.

7 Maximale verbeteringen door datafusie voor A13

In de voorgaande twee hoofdstukken is de eerste vraag van dit onderzoek beantwoord. Te weten de ontwikkeling en implementatie van een methode om reistijdmetingen en metingen uit detectielussen te fuseren ten behoeve van een real-time toestandsbepaling. Om een goede werking te controleren en meer te weten te komen over het presteren, zijn in het vorige hoofdstuk al een aantal testen gedaan. In dit hoofdstuk zullen onder andere aan de hand van die resultaten een aantal testen worden uitgevoerd om de tweede vraag te beantwoorden. Dit betreft de beantwoording van de vraag wat de toegevoegde waarde van het gebruik van reistijdmetingen is ten opzichte van de huidige situatie op Nederlandse rijkswegen.

De testen van het vorige hoofdstuk hadden voornamelijk betrekking op de instellingen van het filter. In paragraaf 7.1 zal vooral worden gekeken naar de specifieke opzet die nodig is voor het beantwoorden van de vraag. Zo komt onder andere een argumentatie en beschrijving van het netwerk aan bod, en wordt de wijze van het verkrijgen van de synthetische meetgegevens besproken. In de paragraaf daarna wordt een overzicht gegeven van de prestaties per uitgevoerde test. Hiertoe wordt eerst de prestatie van het filter voor huidige situatie beoordeeld, wat betekent dat het filter wordt toegepast zonder gebruik te maken van de reistijdmetingen. Daarna worden voor de verschillende configuraties (zie subparagraaf 7.1.4) de simulaties beoordeeld aan de hand van de criteria. Tot slot wordt in de conclusie een vergelijking gemaakt tussen beide onderdelen om zo te zien wat de toegevoegde waarde van het gebruik van reistijdmetingen is, wanneer gebruik wordt gemaakt van de filtertechniek.

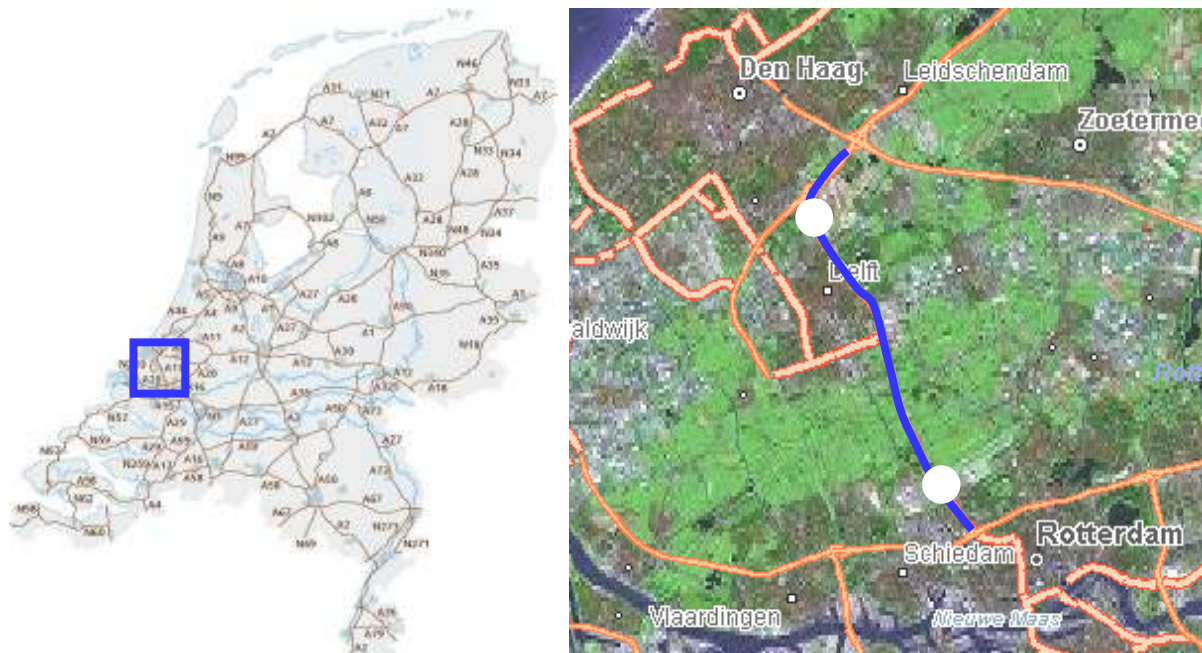
7.1 Opzet onderzoek: casestudie A13

Alvorens de resultaten getoond worden, zal in deze paragraaf de opzet van de testen omschreven worden. Om het onderzoek uit te voeren is het interessant om dit toe te passen op een bestaande situatie. Dit scheidt een aantal praktische voorwaarden om het gebruik van reistijdmetingen te beoordelen. Ten eerste is een realistische testsituatie nodig. Dit is vrij makkelijk te realiseren door (een deel van) een snelweg te beschouwen waarvan de eigenschappen bekend zijn.

Daarnaast moet er data beschikbaar zijn. Detectielussen zijn ruimschoots aanwezig op het Nederlandse wegennet (paragraaf 2.1) en op te vragen via de server van Rijkswaterstaat-AVV. Het nadeel hierbij is dat deze niet altijd beschikbaar zijn en tevens rekenkundig gemiddelde snelheden levert welke voor verkeerskundige toepassingen minder nuttig zijn dan harmonisch gemiddelde snelheden, zie subparagraaf 4.2. Een groter probleem is het verkrijgen van reistijdmetingen. Op het moment van het uitvoeren van dit onderzoek zijn slechts op enkele locaties reistijdcamera's aanwezig op het hoofdwegennet waarvan de datasets gebruikt kunnen worden³¹. De afstanden waarover deze metingen worden gedaan zijn echter van een andere orde dan benodigd voor dit onderzoek.

Zo is de A13 in de richting Den Haag – Rotterdam (zie figuur 7-1) voorzien van camera's bij Knooppunt Ypenburg en Rotterdam Overschie. Dit komt er op neer dat deze over een afstand van 11 kilometer staan. Voor het huidige gebruik van reistijdmetingen (zie paragraaf 2.2) is dit prima. Maar zoals ook in subparagraaf 2.3 gesteld is in het kader van het Nationaal Data Warehouse is deze afstand absoluut niet bruikbaar voor het gebruik van toestandschatten.

³¹ Reistijdmetingen worden momenteel veel gebruikt voor trajectcontroles, maar deze zijn niet beschikbaar.



figuur 7-1 Links het Nederlandse hoofdwegennet (bron: Rijkswaterstaat) met de ligging van de A13. Rechts toont de omgeving in detail (bron: Google Earth) waarbij de A13 is gemarkeerd en de huidige camerolocaties zijn aangeven met de witte stippen.

Momenteel worden op twee locaties op de A13 extra camera's geplaatst. Daardoor komt de afstand tussen de camera's in de orde grootte van de waardes zoals genoemd in het kader van het NDW. Helaas zullen deze metingen pas na het afronden van deze studie beschikbaar komen. Het ontbreken van bruikbare reistijdmetingen is de voornaamste reden om synthetische metingen te gebruiken. Eventueel kan in een latere fase de evaluatie plaatsvinden met echte meetdata.

Daarnaast bieden synthetische metingen een aantal voordelen. Zo is het eenvoudiger om het effect van verschillende afstanden te beoordelen. Dit is iets wat niet mogelijk zou zijn bij het gebruik van echte metingen en eigenlijk voorafgaand aan de plaatsing van de camera's zou moeten plaatsvinden. Dit is een interessante variabele aangezien het een grote impact heeft op de kosten van een dergelijk meetsysteem. Tevens is bij het gebruik van synthetische meetdata makkelijker om de juiste testsituatie te creëren en bijvoorbeeld niet afhankelijk te zijn van ongewone gebeurtenissen als een ongeluk, falende detectieapparatuur of extreme weersomstandigheden. In hoofdstuk 7 zal worden ingegaan op het genereren van deze synthetische meetdata met een ander (microscopisch) verkeersmodel met een andere benadering van de verkeersafwikkeling. Dit is een model dat al veelvuldig is gevalideerd en gekalibreerd en dat een zeer realistisch beeld van de verkeersafwikkeling kan geven voor een bepaald netwerk.

Gezien de bijplaatsing van de twee camera's op de A13 is er voor gekozen om als netwerk de A13 te nemen. Naast het voordeel om het bij mogelijke vervolgstudies te gebruiken biedt deze weg vele verkeerskundig interessante aspecten. Zo is de A13 regelmatig in de file top 10 te vinden en staat dus garant voor verschillende verkeersomstandigheden. Daarnaast zijn er verschillende oorzaken van de congestie. Ten eerste ontstaat regelmatig een congestie door een te grote toestroom van de oprit van Delft Zuid. Om deze toestroom te reguleren is deze oprit voorzien van een toeritdoseerinstallatie. De andere oorzaak van de congestie is een externe bottleneck doordat de file vanaf de A20 terugslaat op de A13. Verder bevinden zich op dit deel van het hoofdwegennet relatief veel op- en afritten. Tot slot is een belangrijke eigenschap van de A13 dat deze aan het einde bij Rotterdam een trajectcontrole van 80 km/uur omvat. Hoe deze aspecten meegenomen worden gedurende de testfase wordt tevens in hoofdstuk 7 besproken.

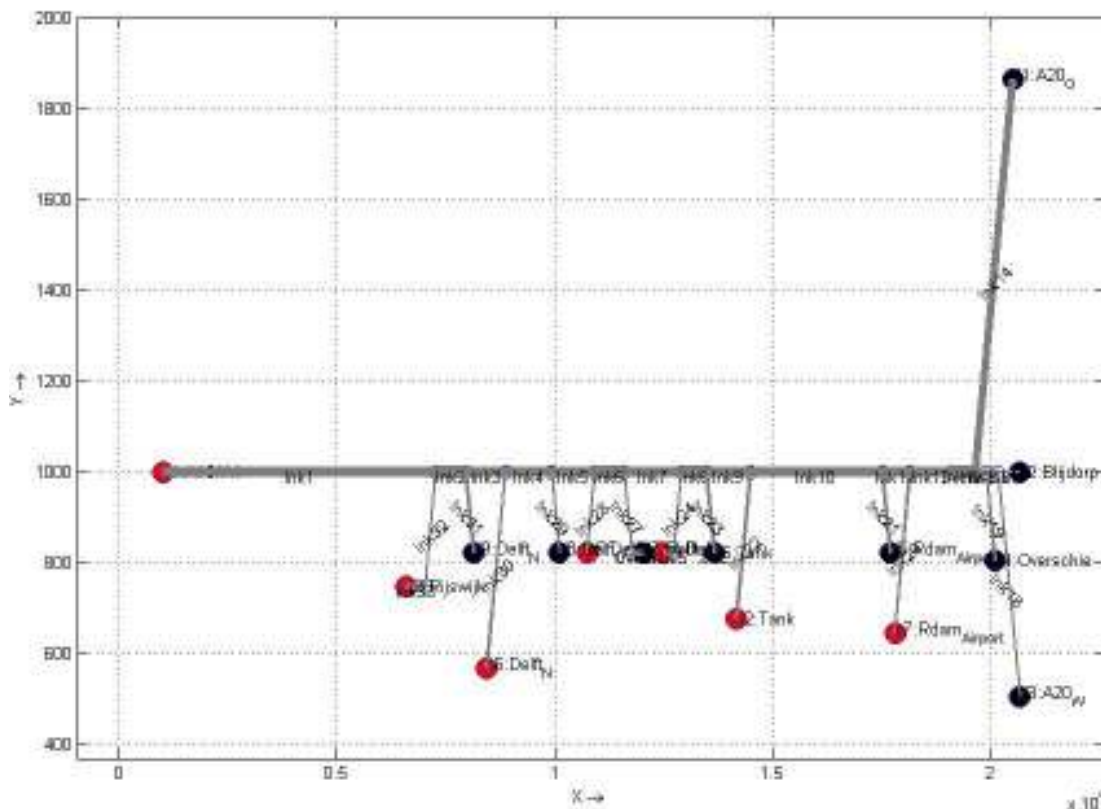
De details van het netwerk worden in de eerste subparagraaf besproken. Daarna wordt de referentiesituatie en het generen van de data toegelicht. Gezien de vele mogelijkheden om het filter te testen, behandelt subparagraaf 7.1.4 welke beperkingen en aannames gebruikt zijn om tot een beperkt aantal testen te komen. Tevens wordt vermeld hoe de verschillende simulaties achteraf beoordeeld zullen worden.

7.1.1 Specificeren testnetwerk

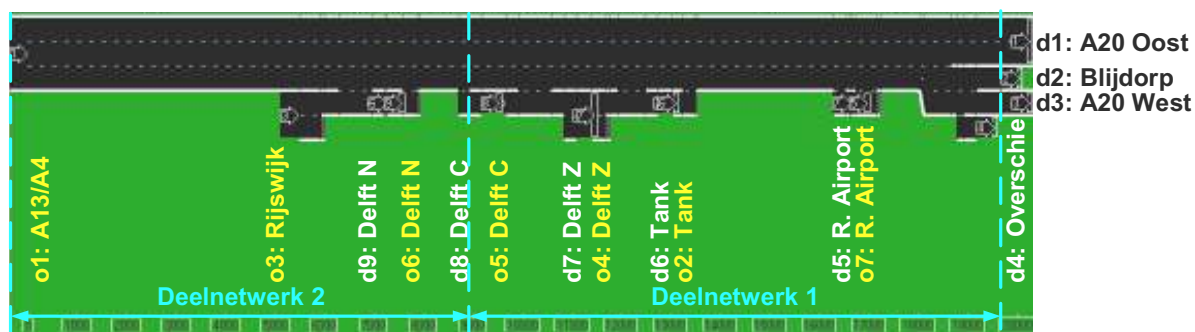
Voordat de testen uitgevoerd kunnen worden, dient het netwerk gespecificeerd te zijn. Zoals gezegd wordt bij de testen in het kader van dit onderzoek uitgegaan van de A13 van Den Haag naar Rotterdam. De eerste stap bij het opzetten van de testen is dan ook om dit netwerk te specificeren. Voor het uitvoeren van het filter zoals in hoofdstuk 6 is het vereist dat dit wordt gedaan op een wijze dat Fastlane het kan verwerken. Daarnaast is het voor het generen van de synthetische data, zie subparagraaf 7.1.3, nodig dat het ook in FOSIM ingevoerd wordt.

Het specificeren van het netwerk bestaat uit een aantal onderdelen. Het eerste is de configuratie van de weg. Hiertoe is gebruik gemaakt van satellietfoto's van de applicatie Google Earth [6]. Hiermee is geïventariseerd waar op- en afritten liggen, hoe lang de wegvakken zijn en het aantal stroken per wegvak. Ten tweede zijn de maximumsnelheden per wegvak bepaald via de snelhedenkaart van AVV [2]. De locatie van de detectoren is bepaald aan de hand van de site "Beschikbaarheid meetnetten" van AVV [1]. Op deze site zijn onder andere de locaties van de detectoren (km langs de weg), het type en de status te vinden. Het netwerk bevat ook een drietal weefstroken. Voor deze wegvakken wordt in Fastlane uitgegaan van 3,5 stroken. Dit is voor de volle capaciteit van de drie doorgaande stroken en de halve strookcapaciteit vanwege de weeffunctie.

Uiteraard is bij het specificeren van het netwerk in beide toepassingen (Fastlane en FOSIM) zoveel mogelijk rekening gehouden met de werkelijke situatie. Het gebruik van Fastlane en het filter brengen echter ook enkele beperkingen met zich mee. De belangrijkste beperking is dat de detectoren in het filter worden gespecificeerd door aan te geven in welke cel ze zich bevinden. Bij de berekeningen wordt aangenomen dat de detector exact in het midden van een cel ligt, zie paragraaf 6.6. Tevens is het gebruikelijk dat de cellen in Fastlane minimaal 250 meter zijn. Zoals ook in paragraaf 4.4 wordt besproken, is het vereist om bij de overgang tussen twee wegvakken met verschillende eigenschappen (maximumsnelheid, aantal stroken) een knoop te plaatsen. Dit betekent automatisch dat dit een overgang tussen twee links is en er dus geen detector kan worden gedefinieerd. Uit verkeerskundig oogpunt worden aansluitingen van op- of afritten op knopen in principe op het meeste stroomafwaartse punt geplaatst. Door deze eisen is het niet altijd mogelijk om de werkelijke situatie correct te modelleren en zijn kleine aanpassingen aangebracht. In bijlage 5 zijn de details van het testnetwerk en een schematisatie van het gebruikte netwerk gegeven, hierna is volstaan met screenshots van het Fastlane en FOSIM netwerk in figuur 7-2 en figuur 7-3. In het figuur 7-3 zijn tevens de namen gegeven van: de herkomsten, bestemmingen, op- en afritten. Alsmede de onderverdeling van het netwerk in twee delen, zie ook subparagraaf 6.3.1 en 6.12.3.



figuur 7-2 Screenshot testnetwerk in Fastlane gebaseerd op A13 van Den Haag (knooppunt Ypenburg) richting Rotterdam (knooppunt Klein Polderplein).



figuur 7-3 Testnetwerk in FOSIM gebaseerd op A13 van Den Haag richting Rotterdam met aanduiding van de opritten/herkomsten (o), afritten/bestemmingen (d) en de gebruikte deelnetwerken. Zie ook bijlage 5.

Om te voorkomen dat door deze beperkingen verschillen ontstaan tussen de netwerken van beide toepassingen, zijn de aanpassingen bij beide netwerken doorgevoerd. In tegenstelling tot de detectoren wordt bij het verweken van reistijdmetingen in het filter juist uitgegaan van (een veelvoud van) gehele cellen om het reistijdtraject te definiëren. Ondanks dat de locaties van de portalen (en dus mogelijke cameralocaties) wel bekeken zijn, is dit geen beperking geweest bij het specificeren van het testnetwerk. Doordat de lengte van de reistijdtrajecten een belangrijke variabele is tijdens het testen, zou dit een extra complex netwerk opleveren. Voor het bepalen van de reistijdtrajecten is uitgegaan van fictieve portalen, zie ook subparagraaf 7.1.3.

7.1.2 Referentiesituatie

Voor het netwerk en de gekozen richting uit de vorige subparagraaf is de avondspits maatgevend. Daarom zullen de testen uitgevoerd worden met een tijdshorizon van drie uur 's middags t/m zeven

uur 's avonds. Gedurende deze vier uur bouwt de spits zich op en beleeft zijn hoogtepunt. Zo ontstaat een referentiesituatie waarin zowel een rustige situatie (begin), opbouwende congestie en afbouwende congestie optreedt. Door een interne bottleneck bij Delft-Zuid door een (te) hoge toestroom van voertuigen vanaf de oprit ontstaat een file. Deze file zorgt voor het ontstaan van een andere file stroomopwaarts.

Om de situatie in FOSIM te maken, dient onder andere de verkeerssamenstelling, het intensiteitenverloop en de herkomst-bestemmingsmatrix gedefinieerd te worden. De verkeerssamenstelling is 80% personenverkeer en 20% vrachtverkeer voor alle herkomsten. De intensiteiten zijn voor alle zeven de herkomsten in stappen van 30 minuten ingevoerd. In tabel 7-1 is een overzicht gegeven van dit verloop. FOSIM maakt gebruik van een herkomst-bestemmingsmatrix om de verdeling van het verkeer over het netwerk vast te leggen. In tabel 7-2 is de gebruikte matrix gegeven waarbij per herkomst de fracties voor de gehele simulatietijd gegeven zijn.

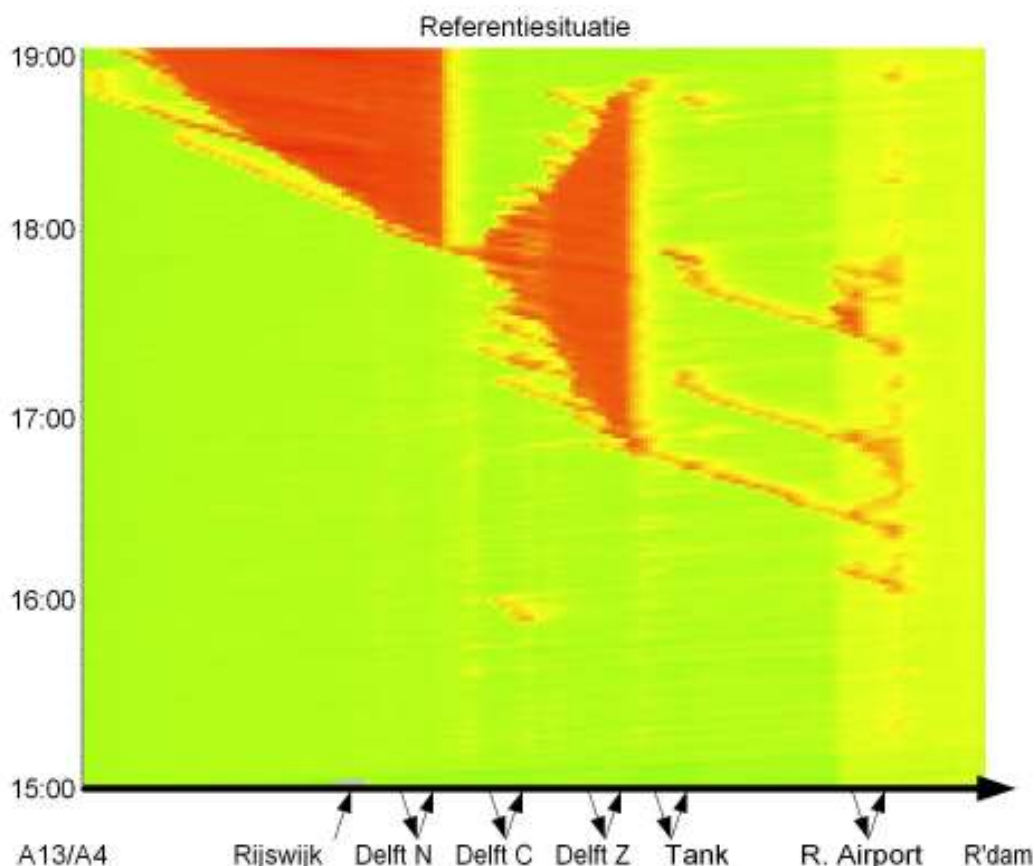
tabel 7-1 Intensiteitenverloop per herkomst in stappen van 1800 seconden uitgedrukt in voertuigen per uur als invoer van FOSIM.

Herkomst	Begin (s)	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600
	Eind (s)	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400
1	A13/A4	4600	4700	4800	4900	5000	4900	4800	4700
2	Tank	45	45	50	55	55	60	60	55
3	Rijswijk	450	460	475	500	525	525	500	480
4	Delft Z	800	850	900	1000	1100	1000	900	850
5	Delft	800	800	850	850	900	900	900	850
6	Delft N	150	175	200	225	250	275	300	300
7	R'dam Airport	200	250	300	350	400	350	300	250

tabel 7-2 Herkomst-bestemmingsmatrix met fracties waarin verkeer van de 7 herkomsten zich verdeelt over de 9 bestemmingen.

	A20 Oost	R'dam Blijdorp	A20 West	R'dam Overschie	R'dam Airport	Tank	Delft Z	Delft	Delft N
A13/A4	30%	10%	20%	2%	4%	1%	14%	14%	5%
Tank	40%	20%	30%	5%	5%				
Rijswijk	40%	19%	30%	5%	5%	1%			
Delft Z	45%	15%	20%	3%	6%	1%	10%		
Delft	40%	15%	20%	3%	6%	1%	10%	5%	
Delft N	35%	10%	15%	2%	4%	1%	14%	14%	5%
R'dam Airport	35%	25%	35%	5%					

Aan de hand van deze verkeersgegevens is voor het netwerk, zoals beschreven in de vorige subparagraaf, de simulatie uitgevoerd. De snelheidscontour die hieruit volgt, is weergegeven in figuur 7-4. Het is niet noodzakelijk om de simulatie meerdere keren uit te voeren met verschillende random seeds. FOSIM wordt slechts gebruikt voor het genereren van een referentiesituatie met de bijbehorende metingen. En dus niet de verkeersontwikkeling onder bepaalde omstandigheden.



figuur 7-4 Snelheidscontour van FOSIM simulatie voor referentiesituatie 1 met een interne bottleneck. Horizontaal de afstand (m) en verticaal de tijd (sec). Rode kleuren geven lage snelheden aan, groene hoge snelheden.

Voordat deze referentiesituatie nagebootst kan worden, is het nodig om de verkeersgegevens ook voor gebruik in Fastlane te specificeren. Voor het intensiteitenverloop (verkeersvraag) geldt dat dit op een gelijke wijze als bij FOSIM wordt gedaan, zie dus tabel 7-1. De verdeling van het verkeer gebeurt echter niet door middel van een HB-matrix, maar aan de hand van turnfracties per knoop. Deze geven aan hoe de totale verkeersstroom van de ingaande link wordt verdeeld over de twee uitgaande links. Om de HB-matrix om te zetten naar turnfracties moet een vertaalslag worden gemaakt. In tabel 7-3 is een overzicht van de turnfracties per knoop met een afruit of splitsing gegeven.

tabel 7-3 Turnfracties afgeleid van HB-matrix en intensiteitenverloop uit FOSIM voor gebruik in Fastlane.

Delft N	Delft	Delft Z	Tank	R'dam Airport	A20 Oost	R'dam Overschie	A20 West
5%	14%	16%	1%	6%	52%	7%	63%

Voor deze studie zullen deze gegevens als exact bekend verondersteld worden. In werkelijkheid zal dit niet het geval zijn, maar om te voorkomen dat een dergelijke onzekerheid voor afwijkingen zorgt is een eventuele invloed tot het minimum beperkt.

7.1.3 Genereren synthetische meetgegevens

Voor het genereren van de meetgegevens wordt FOSIM versie 5.1 [3] gebruikt. Dit is een model dat al veelvuldig is gevalideerd en gekalibreerd en dat een zeer realistisch beeld van de verkeersafwikkeling kan geven voor een bepaald netwerk bestaande uit hoofdwegen. Zoals eerder is aangehaald worden de locaties van de detectoren bepaald door de ligging van de cellen. De ligging van de cellen wordt in beginsel bepaald door de configuratie van het netwerk en de verschillende wegvakken. Op sommige punten zijn kleine aanpassingen gedaan ten behoeve van een realistischere verdeling van de

detectielussen in de verschillende applicaties. In figuur 7-5 zijn de 40 gebruikte detectorlocaties visueel weergegeven in een deel van het FOSIM testnetwerk. Alleen de metingen op de doorgaande stroken van de A13 worden gebruikt. Net zoals in de werkelijkheid zijn detectielussen op de op- en afritten (helaas³²) een uitzondering.



figuur 7-5 Locaties van de 40 dubbele detectielussen op de hoofdroute (A13) die gebruikt worden bij het testen vanaf Den Haag tot het Klein Polderplein.

Een beperking die door het filter wordt opgelegd is dat het zo is geïmplementeerd dat slechts één reistijdtraject gebruikt kan worden. In principe laat de techniek zoals beschreven in het vorige hoofdstuk meerdere reistijdtrajecten wel toe door andere trajecten als een extra databron te zien³³. Dit lijkt echter onnodig complex in deze fase van het onderzoek omdat het niet essentieel is om de vragen uit de probleemstelling te beantwoorden. De complexiteit wordt veroorzaakt door de variërende afstanden van de camera's. Bij gebruik van meerdere trajecten zou dit betekenen dat een verschillend aantal trajecten nodig zou zijn voor hetzelfde netwerk. Tevens zouden per trajectlengte de trajectgrenzen steeds verschillen. Hierdoor zou een verschil in presteren bij een bepaalde trajectlengte ook andere oorzaken kunnen hebben en gevoelig kunnen zijn voor de configuratie van het netwerk.

Bij de locatie van het reistijdtraject is geen rekening gehouden met de aanwezige portalen, maar is aangenomen dat op alle grenzen tussen de cellen fictieve portalen op viaducten zijn waarop de camera's gemonteerd kunnen worden. Dit in verband met de kostenberekening van de reistijdcamera's welke in het volgende hoofdstuk aan bod komt.

Om te zorgen dat de reistijdmetingen een maximale bijdrage kunnen vormen is het noodzakelijk dat het traject zo wordt geplaatst dat de metingen variëren door wisselende verkeersomstandigheden. Bij de bepaling van het testtraject voor de reistijdmetingen is rekening gehouden met deze wetenschap. Zoals ook in de vorige subparagraaf is gebleken, zijn twee oorzaken via congestie aan te wijzen in het geval van een regulier verkeersbeeld van de A13 in de avondspits. Zo is er een bottleneck bij de oprit van Delft-Zuid doordat teveel verkeer de weg op wil³⁴. Daarom is gekozen om het reistijdtraject te laten eindigen iets stroomafwaarts van de oprit van Delft-Zuid.

Gezien de wijze waarop een file zich uitbreidt worden de trajectlengtes bepaald door verschillende locaties van de eerste camera stroomopwaarts van Delft-Zuid. Aangezien de reistijdtrajecten begrensd worden door de celgrenzen is het niet mogelijk om de afstand exact te variëren met 500 meter. In tabel 7-4 en in figuur 7-6 zijn de locaties van de camera's en de bijbehorende afstanden te zien.

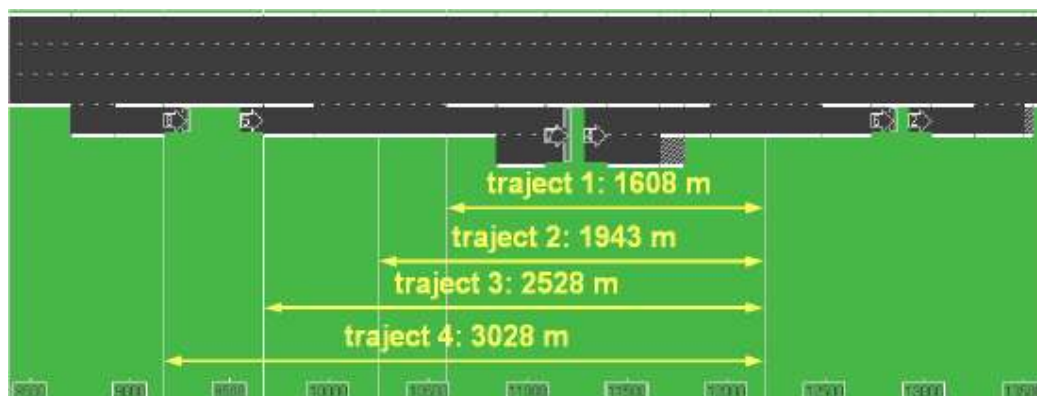
tabel 7-4 Locaties van reistijdcamera's en afstand voor verschillende testtrajecten.

Traject	Beginlocatie (m)	Eindlocatie (m)	Afstand (m)
1	10593	12201	1608
2	10258	12201	1943
3	9673	12201	2528
4	9173	12201	3028

³² Dit zou erg nuttig kunnen zijn voor het bepalen van de trunfracties en de verkeersvraag.

³³ Wanneer het filter aangepast zou worden met meerdere reistijdtrajecten is het niet aan te raden om de verschillende reistijden samen te voegen zoals dat bij de detectoren wordt gedaan, omdat de reistijdtrajecten waarschijnlijk verschillende eigenschappen (lengte traject, periode). Zie ook paragraaf 9.2.

³⁴ In het echt wordt een TDI gebruikt om de toestroom van het verkeer te doseren, maar die is hier buiten beschouwing gelaten.



figuur 7-6 Reistijdtrajecten rondom aansluiting Delft Zuid.

De outputgegevens van de simulatie met (het microscopisch verkeersmodel) FOSIM zijn per individueel voertuig. Voordat deze gebruikt kunnen worden als input voor het filter is het nodig om de gegevens te aggregeren per meetraai en per meetresolutie (één minuut). Zo moeten de reistijden gemiddeld worden voor alle voertuigen die in de betreffende minuut de laatste cameralocatie passeren. De intensiteitgegevens van de detectielussen bestaan uit het aantal voertuigen dat per minuut de betreffende detector passeert. De snelheden dienen niet zomaar gemiddeld te worden, zie ook subparagraaf 4.2. Dit wordt gedaan door de traagheid per voertuig die in de betreffende minuut de detectorlocatie passeert te middelen en vervolgens daaruit de harmonisch gemiddelde snelheid te bepalen.

De synthetische meetgegevens die op deze manier ontstaan, zijn echter nog niet representatief voor de werkelijkheid. Doordat de individuele gegevens met een (microscopisch) verkeersmodel verkregen zijn, zijn ze exact voor de bijbehorende situatie. Dit klinkt natuurlijk ideaal, maar het is niet reëel. Alleen het aggregeren is niet voldoende. Ook moet ruis toegevoegd worden om de afwijkingen van de metingen na te bootsen. Dit kan bijvoorbeeld doordat een meetinstrument niet goed afgesteld is³⁵, of dat een detectielus voertuigen dubbel telt of overslaat. Per type meting is de grootte van de ruis (p^j) verschillend (zie tabel 7-5). De waarden zijn gebaseerd op algemene kentallen, zie ook paragraaf 6.8. Bij de berekening van de meetwaarden worden de geaggregeerde metingen volgens (7-1) t/m (7-3) voorzien van ruis die normaal verdeeld is rondom de werkelijke waarde³⁶.

$$v = v^{FOSIM} \cdot \left(1 + \frac{p^v}{100} randn(0,1) \right) \quad (7-1)$$

$$q = q^{FOSIM} \cdot \left(1 + \frac{p^q}{100} randn(0,1) \right) \quad (7-2)$$

$$tt = tt^{FOSIM} \cdot \left(1 + \frac{p^{tt}}{100} randn(0,1) \right) \quad (7-3)$$

tabel 7-5 Grootte van de ruis (uitgedrukt in een percentage van de werkelijke meetwaarde) verschilt per type meting. De waarden hebben invloed op de metingspecifieke bijdrages.

Type meting (j)	p^j (%)	metingspecifieke bijdrage (ϕ^j)
Reistijd (tt)	3	2.20
Intensiteit (q)	5	0.80
Snelheid (v)	4	1.25

³⁵ Bij de detectielussen kan dit komen door vervorming van instrument, weersomstandigheden (vorst) of wijze van aanleg/diepte van lussen. En bij de camera's door belichting (mist, neerslag), synchronisatie tijdstempels of, harde wind [4].

³⁶ Er wordt dus alleen uitgegaan van incidentele meetafwijkingen. Structurele meetafwijkingen (bias) treden niet op of zijn reeds bij de datacorrectie gecorrigeerd.

Door gebruik te maken van een percentuele afwijking is het mogelijk om deze afwijkingen te verwerken bij het bepalen van de weging van de verschillende databronnen. Wanneer niet relatieve, maar absolute waarden gebruikt zouden worden om de afwijking te definiëren zou het correct berekenen van de weegfactoren erg complex worden. In dat geval zouden de afwijking namelijk allemaal verschillende eenheden hebben. In tabel 7-5 staan in de laatste kolom de metingspecifieke bijdrages zoals die in deze studie zijn gebruikt. Hierbij is de berekeningswijze van (6-14) gebruikt³⁷.

7.1.4 Parameterwaardes

Om de simulaties met het filter te laten beginnen zijn niet alleen een testnetwerk en (synthetische) meetgegevens nodig. Voor het functioneren van het filter is het uiteraard ook nodig dat de parameters een startwaarde hebben. Deze staan in tabel 7-6 vermeld en tenzij de betreffende parameter geschat wordt, blijven deze waarden gelden gedurende de gehele simulatie. De waarden zijn gebaseerd op inschattingen van realistische waarden en de resultaten van de verificatietesten uit het vorige hoofdstuk. Tevens is in de tabel de minimale waarde voor de sigma's gegeven voor de parameters die geschat worden. Zoals ook in paragraaf 6.10 is uitgelegd, zijn deze waarden nodig om te zorgen dat de deeltjes voldoende van elkaar blijven verschillen, ook wanneer de vorige filterstap een hele sterke voorkeur oplevert voor een bepaalde parameterwaarde. Zoals in subparagraaf 6.12.4 beargumenteerd is, wordt per deelnetwerk de kritische snelheid geschat en de stremmingsdichtheid voor het gehele netwerk.

tabel 7-6 Startwaardes van parameters die gedurende de gehele simulatie gelden tenzij betreffende parameter geschat wordt door het filter. En in de laatste kolom de minimale waarden voor de sigma's indien de parameter geschat wordt.

Parameter	Startwaarde parameter	Minimale waarde sigma's
Snelheid bij vrije afwikkeling (1)	130 km/u	-
Snelheid bij vrije afwikkeling (2)	90 km/u	-
Kritische snelheid deelnetwerk 1	80 km/u	2 km/u
Kritische snelheid deelnetwerk 1	80 km/u	2 km/u
Kritische dichtheid	25 vtg/km	-
Stremmingdichtheid	140 vtg/km	4 vtg/km
Aandeel vrachtverkeer	20%	-

tabel 7-7 Fysieke grenzen en verkeerskundige voorwaardes waaraan parameterwaardes moeten voldoen.

Parameter	Fysieke grenzen		Verkeerskundige voorwaarde
	ondergrens	bovengrens	
Snelheid bij vrije afwikkeling (1)	80 km/u	150 km/u	> snelheid bij vrije afwikkeling (2)
Snelheid bij vrije afwikkeling (2)	50 km/u	120 km/u	< snelheid bij vrije afwikkeling (1) & > kritische snelheid
Kritische snelheid	40 km/u	90 km/u	< snelheid bij vrije afwikkeling (1) & < snelheid bij vrije afwikkeling (2)
Kritische dichtheid	15 vtg/km	50 vtg/km	-
Stremmingdichtheid	100 vtg/km	200 vtg/km	-
Aandeel vrachtverkeer	0.0	1.0	-

7.1.5 Criteria

De testen uit hoofdstuk 7 ten behoeve van het verifiëren van een correcte werking werden vooral beoordeeld op basis van de parameterschattingen ten opzichte van de "werkelijke" waarden en van de dichtheiden die door het filter worden bepaald ten opzichte van de "werkelijke" dichtheden. Dit was mogelijk aangezien de "werkelijkheid" gedurende het genereren van de data bekend was. Wanneer

³⁷ In deze studie zijn deze waarden dus als exact bekend verondersteld, wanneer met werkelijke data gewerkt wordt moet goed onderzocht worden wat deze waarden zijn. Dan is de ruis op de metingen immers onbekend.

echter echte data gebruikt worden, zijn deze vergelijkingen niet meer mogelijk. Zo zijn de geschatte parameterwaardes alleen kwalitatief te beoordelen aan de hand van verkeerskundige kennis en niet kwantitatief te becijferen. Ook zijn de dichtheden niet bekend. Het vergelijken van de toestandsbepaling door het filter met de (FOSIM-)werkelijkheid zal dus alleen aan de hand van meetbare grootheden moeten gebeuren. Het meest voor de hand liggend is om het kwalitatief te vergelijken aan de hand van snelheden.

Voor het beoordelen van de kwaliteit van de toestandsbepaling wordt deze vergeleken met de toestand gedurende het genereren van de metingen. Dit zou visueel kunnen, maar dit kan leiden tot subjectieve fouten. Daarom is gekozen om de beoordeling te baseren op een tweetal objectieve maten. Ten eerste is dit een algemene maat die gebaseerd is op de gemiddelde fout. Hiervoor wordt de RMSE (Root Mean Square Error) gebruikt. Door het kwadrateren heeft deze wijze van middelen als eigenschap dat grote fouten relatief zwaarder worden gewogen dan kleine fouten.

Ten tweede kan regressie worden gebruikt om een uitspraak te doen over de kwaliteit van de bepaling. Deze methode biedt het voordeel dat het ook inzicht geeft in een eventuele systematische fout. Zo'n systematische fout zorgt bij de RMSE voor een hoge waarde. Ondanks dit kan een duidelijk verband worden gevonden tussen de bepaalde toestand en de werkelijke toestand. Wanneer de toestand bijvoorbeeld alleen systematisch wordt overschat, zou dit in (7-4) de α tot uitdrukking moeten komen en zou de β 1,0 moeten zijn. Hoe verder de β afwijkt van de 1,0 hoe slechter.

$$v^{filter} = \alpha + \beta \cdot v^{FOSIM} \tag{7-4}$$

Naast de mogelijkheid om via de kleinste kwadratenmethode het verband tussen de bepaalde en "werkelijke" snelheden te leggen geeft deze methode ook nog inzicht in de kwaliteit er van. Een voorbeeld hiervan is de determinatiecoëfficiënt (R^2). Deze geeft een indruk van de mate waarin de verschillende combinaties van bepaalde en "werkelijke" snelheden verklaard kunnen worden door het verband (7-4). Om een idee te geven van de betekenis staat in tabel 7-8 per interval van R^2 de mate waarin het verband deze combinaties kan verklaren.

tabel 7-8 Betekenis van R^2 om optredende combinaties van bepaalde en "werkelijke" snelheden te verklaren met het verband resulterende uit regressieanalyse.

R^2	Verklaarbaarheid door verband (7-4)
< 0,10	zeer zwak
0,10 - 0,25	zwak
0,25 - 0,50	matig
0,50 - 0,75	sterk
0,75 - 0,90	zeer sterk
> 0,90	uitzonderlijk sterk

Omdat het testnetwerk is opgedeeld in twee deelnetwerken en slechts één van deze netwerken voorzien is van een mogelijkheid voor reistijdmetingen worden de resultaten ook per deelnetwerk bekeken. Samen met het gehele netwerk ontstaan zo per test drie gebieden waarvoor de vergelijkingen worden gedaan.

Tevens kan onderscheid gemaakt worden hoe de betreffende toestandsbepaling scoort voor de periode met vrije afwikkeling (VA), opbouwende congestie (OC) en afbouwende congestie (AC). Voor het gehele netwerk en deelnetwerk 1 is dit gebaseerd op de toestanden gedurende het genereren van de metingen rondom bottleneck 1. Bij deelnetwerk 2 treden slechts twee toestanden (VA en OC) op gedurende het genereren van metingen. Voor het gehele netwerk treedt van 15:00 tot 16:20 geen congestie (VA) op. Voor deelnetwerk 1 geldt dat congestie daarna gaat opbouwen tot 17:55, terwijl deelnetwerk 2 tot 17:55 de toestand nog VA is. Vanaf dan neemt de congestie in deelnetwerk 1 af (AC) en neemt de congestie in deelnetwerk 2 juist toe. Daarom is gekozen voor de opdeling in periodes zoals in tabel 7-9 vermeld. Er is gekozen voor 10 minuten overlap om ook de overgang tussen de fases te beoordelen.

tabel 7-9 Per (deel)netwerk de periodes waarvoor verschillende toestanden optreden bij de FOSIM metingen en gebruikt worden om de toestandsbepaling te beoordelen.

Netwerk	Totaal	VA	OC	AC
Geheel	15:00-19:00	15:00-16:30	16:10-18:05	17:45-19:00
Deelnetwerk 1	15:00-19:00	15:00-16:30	16:10-18:05	17:45-19:00
Deelnetwerk 2	15:00-19:00	15:00-18:05	17:45-19:00	-

Deze studie gaat niet in op andere vormen van congestie zoals ten gevolge van een ongeluk. De locatie hiervan kan namelijk niet beredeneerd worden en is (bijna) geheel willekeurig. Om de omvang van het testen beperkt te houden, is het niet te doen om ongelukken op verschillende locaties te laten plaatsvinden en de werking te beoordelen.

7.2 Resultaten: maximaal te behalen voordeel voor A13

Op basis van de testopzet en de verschillende opties uit de vorige paragraaf zijn vijf verschillende combinaties te testen. Dit aantal is gebaseerd op de huidige situatie en vier mogelijke situaties waarbij reistijdmetingen worden gebruikt.

Voor de huidige situatie zal alleen gebruik gemaakt worden van synthetische meetgegevens uit de detectielussen. In subparagraaf 7.2.1 worden de resultaten van deze test gegeven. Hierbij wordt de toestandsbepaling door het filter vergeleken met de bijbehorende "werkelijke" FOSIM-situatie volgens de criteria zoals omschreven in subparagraaf 7.1.5. Voor de vier mogelijk toekomstige situaties worden de testen op een vergelijkbare wijze verwerkt in subparagraaf 7.2.2.

7.2.1 Huidige situatie

Het uitvoeren van testen op basis van de huidige situatie voor de A13 betekent dat wel de harmonisch gemiddelde snelheden en intensiteiten worden meegenomen, maar de reistijdmetingen niet worden gebruikt. Zoals in 7.1.3 omschreven is, liggen de detectoren hierbij vrijwel om de 500 meter. De resultaten van deze test worden vooral gebruikt om de aanvullende waarde van datafusie met gegevens uit detectielussen en reistijdgegevens te kunnen bepalen in de volgende subparagraaf.

tabel 7-10 Presteren van testen met huidige situatie (alleen detectielussen) voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart uitgedrukt in de RMSE per criteria.

Testspecificaties		RMSE (km/u)			
Nr	Netwerk	Totaal	VA	OC	AC
H1	Geheel	17	9	18	26
H1.1	Deelnetwerk 1	18	9	16	27
H1.2	Deelnetwerk 2	16	12	24	-

tabel 7-11 Presteren van testen met huidige situatie voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart beoordeeld met behulp van regressie (goed: $\beta = 1,0$; $\alpha = 0$).

Testspecificaties		β				α (km/u)			
Nr	Netwerk	Totaal	VA	OC	AC	Totaal	VA	OC	AC
H1	Geheel	0,55	0,18	0,61	0,40	32	74	22	35
H1.1	Deelnetwerk 1	0,58	0,29	0,58	0,40	28	64	26	32
H1.2	Deelnetwerk 2	0,53	-0,03	0,46	-	35	92	35	-

Uit beide tabellen blijkt dat de toestandsbepaling met alleen gegevens uit detectielussen niet erg goed zijn. De gemiddelde snelheidsverschillen van zo'n 20 km/uur voor de totale tijdshorizon (tabel 7-10) worden vooral veroorzaakt door grote afwijkingen gedurende spitsperiodes. De snelheden bij VA komen al dichterbij in de buurt, met verschillen onder de 10 km/uur. Bij toestandsbepaling is men echter geïnteresseerd in de situaties die afwijken van VA. Voor OC scoort het eerste deelnetwerk beduidend beter dan het tweede deelnetwerk. Terwijl de prestaties bij AC te wensen overlaten.

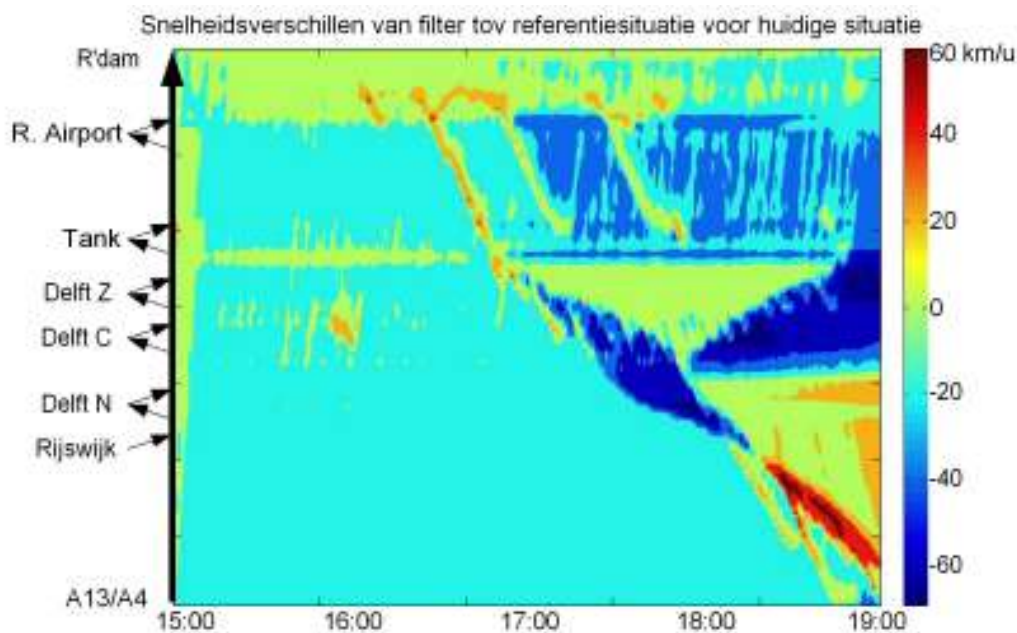
Het beoordelen aan de hand van regressie (tabel 7-11) levert ook weinig duidelijkheid op. Normaal gesproken is voor β een waarde tussen de 0,75 en 1,25 acceptabel. In dit geval is de maximale

waarde echter 0,61 met een structurele fout van 22 km/uur. Dit treedt op bij OC in deelnetwerk 1 (dus tussen 16:10 en 18:05) en geldt wanneer het gehele netwerk wordt beschouwd. Een ander opvallend aspect is dat met regressie de verbanden die geschat worden voor de VA-periodes zeer slecht zijn. Deze conclusies worden onderstreept door de determinatiecoëfficiënt (R^2). In tabel 7-12 is te zien dat de verbanden voor de OC-periodes sterk te noemen zijn. Dit zorgt er voor dat er voor deelnetwerk 2 in totaal ook een sterk verband is. Het verband echter slecht (zie tabel 7-11) met een β van 0,53. Ook is te zien dat de gevonden verbanden voor de VA zeer zwak tot zwak zijn. H1-OC en H1.1-OC scoren dus als enige relatief goed.

tabel 7-12 Determinatiecoëfficiënten voor toestandsbepaling met alleen detectielussen voor verschillende (deel)netwerken en periodes.

Nr	R^2			
	Totaal	VA	OC	AC
H1	0,46	0,10	0,56	0,37
H1.1	0,37	0,22	0,55	0,25
H1.2	0,58	0,00	0,53	-

Ook al is het minder gewenst om de resultaten visueel te beoordelen, is in figuur 7-7 de verschilplot gegeven van de toestandsbepaling ten opzichte van de werkelijke toestand. Dit verklaart deels het matige presteren van de toestandsbepaling. In bijlage 6 zijn de overige visualisaties weergegeven.



figuur 7-7 Verschilplot van de snelheden bij de toestandsbepaling met alleen detectielussen ten opzichte van de werkelijke snelheden bij het generen van de metingen. Rood: te hoge snelheid, blauw: te lage snelheid.

7.2.2 Datafusie: additionele waarde

Ondanks het matige presteren van de huidige situatie zal in deze subparagraaf worden gekeken naar de toegevoegde waarde van reistijdmetingen. Daartoe worden de prestaties van de toestandsbepalingen met de gegevens uit de detectielussen aangevuld met de verschillende reistijdmetingen. Hierdoor ontstaan vier testen (A1, A2, A3 en A4) waarbij gebruik gemaakt is van de vier trajecten zoals omschreven in subparagraaf 7.1.3. Deze subparagraaf vermeldt tevens de metingspecifieke bijdrages waarmee rekening is gehouden.

De prestaties van de verschillende testen zijn wederom geëvalueerd aan de hand van de criteria uit subparagraaf 7.1.5. Om goed inzicht te krijgen in de verschillen zijn per (deel)netwerk additionele testen vergeleken ten opzichte van de testen zonder reistijdmetingen. Dit is zowel gedaan aan de

hand van de RMSE (tabel 7-13) als de regressie analyse (tabel 7-14). Om de laatste tabel overzichtelijk te houden zijn de R2 waardes niet vermeld en worden later genoemd bij de interpretatie van de tabellen.

tabel 7-13 Presteren van testen met detectielus- en reistijdmetingen voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart uitgedrukt in de RMSE per criteria.

Testspecificaties			RMSE (km/u)			
Nr	Netwerk	Traject	Totaal	VA	OC	AC
H1	Geheel	-	17	9	18	26
A1	Geheel	1608m	28	9	34	42
A2	Geheel	1943m	30	9	36	44
A3	Geheel	2528m	24	11	26	37
A4	Geheel	3028m	27	12	32	38
H1.1	Deelnetwerk 1	-	18	9	16	27
A1.1	Deelnetwerk 1	1608m	20	11	22	28
A2.1	Deelnetwerk 1	1943m	20	11	22	28
A3.1	Deelnetwerk 1	2528m	17	12	19	23
A4.1	Deelnetwerk 1	3028m	17	12	19	21
H1.2	Deelnetwerk 2	-	16	12	24	-
A1.2	Deelnetwerk 2	1608m	35	22	55	-
A2.2	Deelnetwerk 2	1943m	38	24	60	-
A3.2	Deelnetwerk 2	2528m	30	17	47	-
A4.2	Deelnetwerk 2	3028m	35	24	52	-

Uit de evaluatie van de prestaties aan de hand van de RMSE blijkt dat datafusie geen structurele verbetering oplevert. De gemiddelde fouten bij toepassen van de reistijden zijn groter dan zonder gebruik van reistijden. Dit geldt voor alle (deel)netwerken en alle periodes. Behalve voor deelnetwerk 1 gedurende afnemende congestie bij gebruik van reistijdmetingen over een afstand van 2528 en 3028 meter. In deze gevallen daalt de gemiddelde fout met 4 respectievelijk 6 km/uur ten opzichte van de snelheden op basis van enkel detectielusgegevens.

Voor deelnetwerk 1 (waar de reistijdtrajecten zich in bevinden) is een ander opvallend aspect. Bij toenemende afstand van de reistijdtrajecten neemt de fout af. Dit is opvallend aangezien de informatiedichtheid bij lange trajecten lager ligt dan bij korte trajecten. Men zou dan ook verwachten dat een beter resultaat zou worden behaald bij de korte trajecten. Voor deeltraject 2 is deze conclusie niet te trekken. De fouten lijken willekeuriger te zijn, waarbij de A3.2 het minst slecht naar voren komt. De fouten hierbij zijn echter anderhalf tot twee keer zo groot als die van H1.2. Een vergelijkbaar verschijnsel is te zien wanneer naar het gehele netwerk wordt gekeken.

tabel 7-14 Presteren van testen met detectielus- en reistijdmetingen voor totale netwerk en twee deelnetwerken apart beoordeeld met behulp van regressie (goed: $\beta = 1,0$; $\alpha = 0$).

Testspecificaties			β				α (km/u)			
Nr	Netwerk	Traject	Totaal	VA	OC	AC	Totaal	VA	OC	AC
H1	Geheel	-	0,55	0,18	0,61	0,40	32	74	22	35
A1	Geheel	1608m	0,57	-0,01	0,48	0,24	25	94	20	31
A2	Geheel	1943m	0,53	0,00	0,43	0,18	28	93	22	35
A3	Geheel	2528m	0,57	0,04	0,58	0,31	29	90	19	34
A4	Geheel	3028m	0,47	0,01	0,37	0,22	35	92	31	40
H1.1	Deelnetwerk 1	-	0,58	0,29	0,58	0,40	28	64	26	32
A1.1	Deelnetwerk 1	1608m	0,68	0,13	0,59	0,55	20	81	20	18
A2.1	Deelnetwerk 1	1943m	0,69	0,14	0,59	0,57	19	81	20	16
A3.1	Deelnetwerk 1	2528m	0,70	0,20	0,62	0,66	21	76	21	15
A4.1	Deelnetwerk 1	3028m	0,68	0,18	0,59	0,66	23	77	24	17
H1.2	Deelnetwerk 2	-	0,53	-0,03	0,46	-	35	92	35	-
A1.2	Deelnetwerk 2	1608m	0,52	-0,21	0,02	-	24	106	34	-
A2.2	Deelnetwerk 2	1943m	0,45	-0,23	-0,12	-	29	107	41	-
A3.2	Deelnetwerk 2	2528m	0,49	-0,24	0,11	-	32	113	39	-
A4.2	Deelnetwerk 2	3028m	0,35	-0,25	-0,08	-	39	108	48	-

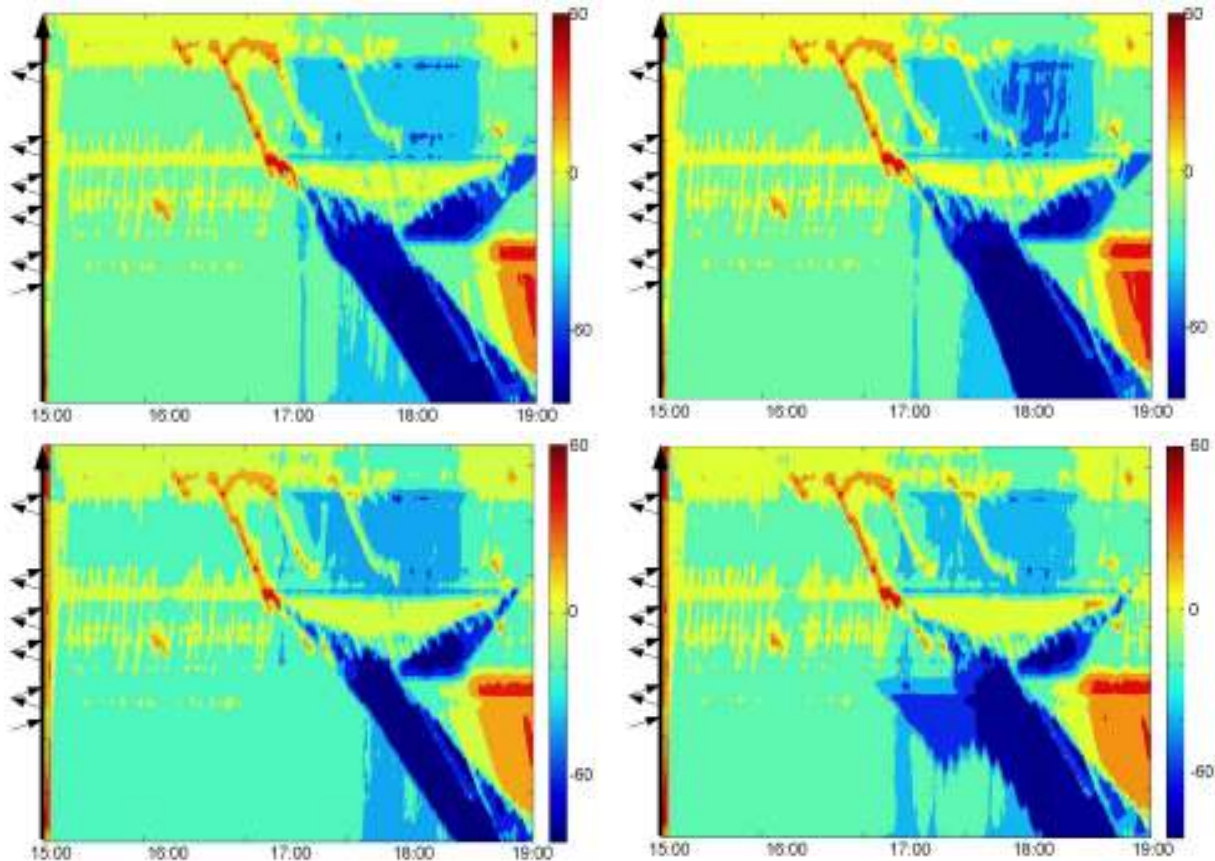
Ook uit de resultaten van de regressie analyse zijn voor de toegevoegde waarde geen uitgesproken verbeteringen met betrekking tot het gebruik van reistijden te melden. Hoewel het meer inzicht geeft in het presteren, is voor geen van de combinaties van (deel)netwerk en periode een bevredigende β gevonden. De maximale waarde van 0,7 is altijd nog magertjes.

Net als bij de evaluatie aan de hand van de RMSE komen alleen bij beschouwing van deelnetwerk 1 consequente verbeteringen naar voren. En in tegenstelling tot de evaluatie aan de hand van de gemiddelde verschillen komen hiervoor zelfs een aantal verbeteringen naar voren. Zo zijn de uitkomsten voor alle afstanden een verbetering tijdens OC en AC. En daardoor wordt de toestandsbepaling over de gehele periode ook beter. De verbeteringen zijn vooral duidelijk bij AC, hier nemen de β 's duidelijk toe en daalt de structurele fout aanzienlijk. Gedurende OC zijn de verbeteringen vooral te danken aan de verlaging van de structurele fout.

Deze resultaten doen vermoeden dat reistijdmetingen deels van toegevoegde waarde kunnen zijn. Echter moet opgemerkt worden dat de betrouwbaarheid hiervan nihil is. De R^2 van ligt namelijk voor ieder van de betreffende testen tussen de 0,32 en de 0,47. Dit betekent dat de verklaarbaarheid van de geschatte verbanden voor de optredende snelheidscombinaties matig is. Dit samen met de relatief lage β 's is geen reden om aan te nemen dat de datafusie met reistijden een substantiële verbetering oplevert.

Voor de overige delen van het netwerk zijn slechts sporadische verbeteringen in de α en/of β waar te nemen. En ook hiervoor geldt dat de R^2 aangeeft dat de verklaarbaarheid door het verband in bijna alle gevallen zwak is. De enige uitzondering hierop is test A3 (gehele netwerk met een trajectlengte van 2528 meter) voor OC met een R^2 van 0,39 en een relatief hoge β van 0,58. In tegenstelling tot de evaluatie met de RMSE geven de regressie resultaten geen relaties tussen de foutontwikkeling en de variërende trajectlengtes. Wel valt wederom op dat de testen met traject 3 het minst slecht scoren.

Ter ondersteuning zijn voor de vier testen in figuur 7-8 de verschilplots weergegeven. In bijlage 7 zijn de verschillende figuren uitgebreid en duidelijker terug te vinden. De figuren hier dienen alleen om een indruk te krijgen waar de verschillen door veroorzaakt worden. Daarbij valt direct op dat snelheid van de schokgolf bij test A3 (links onder) het best overeenkomt. Ook wijkt de tijd waarop de congestie bij bottleneck 2 begint het minste af. Bij test A4 (rechts onder) is te zien dat de het filter niet goed in staat is om de capaciteitsval door de tweede bottleneck later toe te passen dan die door de eerste bottleneck.



figuur 7-8 Verschilplots van de toestandsbepaling A1 (links boven), A2 (rechts boven), A3 (links onder) en A4 (rechts onder) bij gebruik van alle detectielussen én reistijden ten opzichte van de werkelijke snelheden. Rood: te hoge snelheid, blauw: te lage snelheid.

7.3 Conclusie

Ten eerste blijkt het filter slecht in staat te zijn om de toestand goed te bepalen. Dit is waarschijnlijk te wijten aan een te complexe referentiesituatie voor de veronderstelde, eenvoudige wijze van verkeersafwikkeling. In hoofdstuk 6 is daarom ook al een aanpassing gedaan en is het netwerk opgedeeld in twee deelnetwerken. Dit zorgt voor een aanzienlijke verbetering. Helaas is dit nog niet genoeg om tot een goede toestandsbepaling te komen. Zo toont figuur 7-7 dat er nog aanzienlijke snelheidsverschillen optreden wanneer alleen detectielussen worden gebruikt. Dit is in wezen het bepalen van de toestand op basis van gegevens die momenteel beschikbaar zijn van het Nederlandse wegennet.

Aan de andere kant blijkt dit een zeer goed resultaat te zijn als het wordt vergeleken met de resultaten waarbij ook reistijdmetingen worden gebruikt op een deel van het traject. In tegenstelling tot wat men zou verwachten levert datafusie met reistijden bij de uitgevoerde testen over het algemeen geen winst op. In tegendeel zelfs. Voor de meeste (deel)testen zijn de toestandsbepalingen veel slechter. Vooral voor deelnetwerk 2, waar geen reistijdmetingen zijn, verdubbelen de fouten zich al snel tot 30 a 40 km/uur gemiddeld (RMSE). Voor deelnetwerk 1, waar de reistijdtrajecten zich in bevinden, blijven de gemiddelde snelheidsverschillen ongeveer gelijk. Maar hier toont de regressie analyse dat de structurele fout (α) rondom de congestie aanzienlijk daalt, al geeft de determinatiecoëfficiënt (R^2) dat de verklaarbaarheid matig is. Over het algemeen zijn de uitkomsten dus beter, al zijn de uitschieters extremer wat de betrouwbaarheid niet goed doet. De enige verbetering is zichtbaar bij afnemende congestie voor het netwerk waarin de reistijdmetingen zich bevinden. Deze wegen echter niet op tegen de verslechtingen gedurende de andere periode zodat over de totale periode de resultaten ook minder goed zijn dan zonder het gebruik van reistijdmetingen.

Het grote verschil tussen de resultaten van beide deelnetwerken maakt het interessant om te kijken of er meer voordeel te behalen is wanneer meer reistijdtrajecten gebruikt worden. Zo zou het kunnen dat, door de opzet van het filter en de testopzet, de toegevoegde waarde niet goed tot uiting komt. Zo kan het dat de matige verklaarbaarheid vooral wordt veroorzaakt door delen waar geen reistijdmetingen van zijn. En daardoor worden de overige delen van het netwerk nadelig beïnvloed. Dit zwakt de aanvullende waarde van de reistijden af. Het pleit ook voor een verdere opdeling van het netwerk.

Naast de resultaten van de verschillende testen ten opzichte van de referentiesituatie (alleen detectielussen) brengt het vergelijken van resultaten van de additionele testen onderling ook een opmerkelijk punt aan het licht. De foutontwikkeling voor deelnetwerk 1 voor test A1.1, A2.1, A3.1 en A4.1 laat zien dat de fout daalt naarmate de afstand toeneemt. Dit is zeker niet wat men zou verwachten en kan zowel uitgelegd worden ten voordele als ten nadele van de additionele waarde van reistijdmetingen.

Het eerste argument is de testopzet die gebruikt is. Het toepassen van slechts één reistijdtraject op een beperkt deel van het netwerk zorgt er voor dat bij een toenemende trajectlengte een groter deel van het netwerk is voorzien van een reistijd. Deze hogere dekking van het netwerk kan de oorzaak zijn dat de lange reistijdtrajecten relatief goed scoren. En dit zou betekenen dat het gebruik van reistijden nuttig kan zijn. Daarnaast kan de ligging van de trajecten in de testopzet een bepalende rol spelen. Bijvoorbeeld doordat alle reistijdtrajecten alleen de gevolgen van de eerste bottleneck meten. De reden dat de langere trajecten relatief goed scoren kan veroorzaakt worden doordat deze tevens inzicht geven op de staart van de congestie ten gevolge van de eerste bottleneck. Deze ontwikkeling van de staart heeft invloed op de ontwikkeling van de congestie bij bottleneck 2.

Het andere argument kan zijn dat reistijdmetingen per definitie niet bruikbaar zijn voor het bepalen van de toestand. Een mogelijke oorzaak van deze onbruikbaarheid is dat één enkele reistijdmeting geen directe relatie heeft met één toestand, maar kan ontstaan bij verschillende toestanden. Deze eigenschap leidt wellicht tot de relatief goede score voor een configuratie met een lagere reistijdinformatiedichtheid (langer traject).

Naar aanleiding van de uitgevoerde testen kan weinig worden gezegd over additionele waarde in het algemeen. De waarde van één enkel traject op een deel van het netwerken is echter niet nuttig gebleken bij het toepassen van de ontwikkelde methode en het testnetwerk. Zoals hiervoor is geschetst hoeft dit niet te betekenen dat reistijdmetingen geheel onbruikbaar zijn. Verder onderzoek moet uitwijzen of reistijden per definitie niet bruikbaar zijn of dat het komt door de testopzet. Ook moet worden onderzocht of de lokale en marginale winsten een basis kunnen vormen betere toestandsbepaling bij het gebruik van reistijdmetingen.

8 Vervangende waarde van reistijdmetingen voor de A13

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de derde vraag, te weten: "Wat is de optimale strategie bij het vervangen van detectielussen door reistijdcamera's?". Ondanks de slechte toegevoegde waarde die reistijdmetingen hebben voor een toestandbepaling (zie het vorige hoofdstuk) is dit toch interessant om te bekijken. Eerder is al genoemd dat een mogelijke winst niet alleen te behalen is in de kwaliteit van de toestandbepaling, maar ook in de kosten die hiermee gemoeid zijn. In dit hoofdstuk zal daarom worden gekeken hoe de toestandbepaling presteert bij gebruik van reistijdmetingen en het verwijderen van detectielussen. Daartoe zullen in de eerste paragraaf een aantal strategieën worden beschreven. In paragraaf 8.1 zal worden ingegaan op de kostenberekening. Daarna zullen de resultaten van de uitgevoerde testen worden gegeven. Tot slot zal er een conclusie worden gegeven over de vervangende waarde van de reistijdmetingen.

8.1 Strategieën

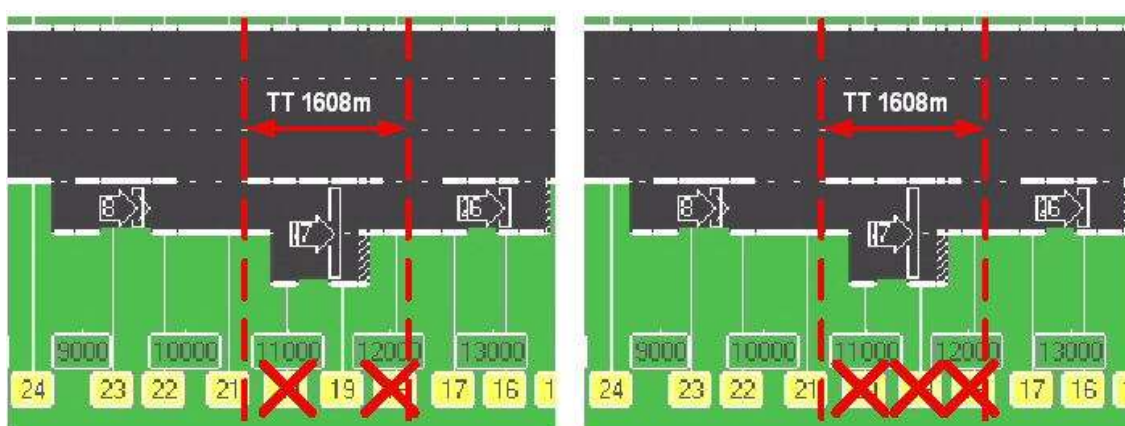
Om de impact van het verwijderen van detectielussen te beoordelen zullen in deze paragraaf, per trajectlengte, twee tot drie strategieën worden omschreven die getest zullen worden. Aangezien de huidige opzet van het filter slechts één reistijdtraject toelaat, zijn alleen voor het betreffende reistijdtraject detectielussen verwijderd. Bij de interpretatie en de kostenberekening zal hier ook rekening mee gehouden worden. Bij het bepalen welke detectielussen verwijderd worden, is zoveel als mogelijk rekening gehouden met het gebruik van detectielussen voor andere doeleinden³⁸. In de volgende subparagrafen zal, per afstand van het reistijdtraject, een overzicht worden gegeven van de detectielussen die verwijderd zijn.

8.1.1 Traject 1 – 1608 meter: 2 strategieën

Aangezien dit een kort traject is, zijn slechts twee strategieën geformuleerd. Het traject loopt van 10593 meter tot 12201 meter. Binnen het traject liggen drie detectoren (18, 19 en 20). In tabel 8-1 staat aangegeven waar deze detectoren liggen en welke per strategie worden gebruikt. Dit is tevens in figuur 8-1 visueel weergegeven.

tabel 8-1 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 1.

Strategie	Locatie en gebruik detectoren		
Nr.	18: 12059 m	19: 11521 m	20: 10991 m
S1-1	nee	ja	nee
S1-2	nee	nee	nee



figuur 8-1 Detectoren die wordt vervangen bij S1-1 (links) en S1-2 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 1.

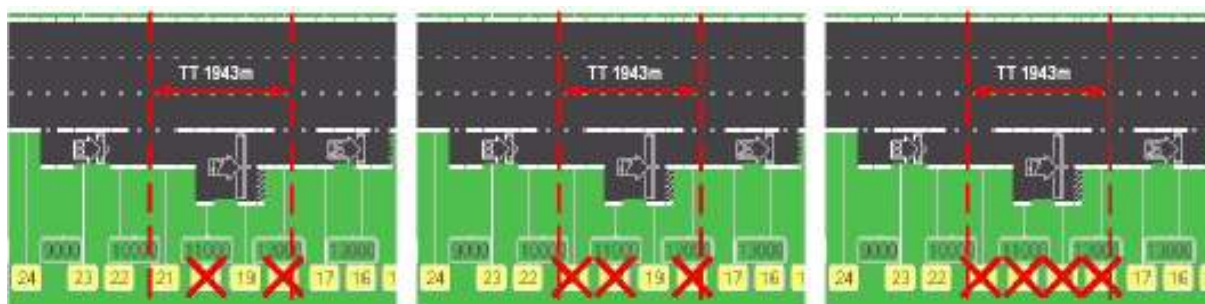
³⁸ Zoals detector 19 die tevens gebruikt kan worden door een TDI.

8.1.2 Traject 2 – 1943 meter: 3 strategieën

Het tweede traject loopt van 10258 meter tot 12201 meter. Binnen het traject liggen vier detectoren (18 t/m 21). In tabel 8-2 staat aangegeven waar deze detectoren liggen en welke per strategie worden gebruikt. Dit is tevens in figuur 8-2 visueel weergegeven.

tabel 8-2 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 2.

Strategie	Locatie en gebruik detectoren			
	18: 12059 m	19: 11521 m	20: 10991 m	21: 10426 m
S2-1	nee	ja	nee	ja
S2-2	nee	ja	nee	nee
S2-1	nee	nee	nee	nee



figuur 8-2 Detectoren die wordt vervangen bij S2-1 (links), S2-2 (midden) en S2-3 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 2.

8.1.3 Traject 3 – 2528 meter: 3 strategieën

Het tweede traject loopt van 9673 meter tot 12201 meter. Binnen het traject liggen vijf detectoren (18 t/m 22). In de tabel 8-3 staat aangegeven waar deze detectoren liggen en welke per strategie worden gebruikt. Dit is tevens in figuur 8-3 visueel weergegeven.

tabel 8-3 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 3.

Strategie	Locatie en gebruik detectoren				
	18: 12059 m	19: 11521 m	20: 10991 m	21: 10426 m	22: 9798 m
S3-1	nee	ja	nee	nee	ja
S3-2	nee	nee	ja	nee	nee
S3-1	nee	nee	nee	nee	nee



figuur 8-3 Detectoren die wordt vervangen bij S3-1 (links), S3-2 (midden) en S3-3 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 3.

8.1.4 Traject 4 – 3028 meter: 3 strategieën

Het tweede traject loopt van 9173 meter tot 12201 meter. Binnen het traject liggen zes detectoren (18 t/m 23). In de tabel 8-4 staat aangegeven waar deze detectoren liggen en welke per strategie worden gebruikt. Dit is tevens in figuur 8-4 visueel weergegeven.

tabel 8-4 Locatie en gebruik van detectoren per strategie voor reistijdtraject 4.

Strategie	Locatie en gebruik detectoren						
	Nr.	18: 12059 m	19: 11521 m	20: 10991 m	21: 10426 m	22: 9798 m	23: 9298 m
S4-1		nee	ja	nee	ja	nee	ja
S4-2		nee	ja	nee	nee	ja	nee
S4-1		nee	nee	nee	ja	nee	nee



figuur 8-4 Detectoren die wordt vervangen bij S4-1 (links), S4-2 (midden) en S4-3 (rechts) bij het testen van de vervangende waarde van reistijdmetingen met traject 4.

8.2 Kosten

Voor het bepalen van de kosten per strategie wordt een gemiddelde prijs per kilometer berekend. De reden hiervoor is dat de detectielussen alleen op het deel van het reistijdtraject worden vervangen. Wanneer de kosten dan voor het gehele netwerk berekend zouden worden, treden slechts marginale verschillen op tussen de strategieën.

Voor het bepalen van de kosten zijn helaas geen exacte bedragen bekend. In verband met de huidige projectfase van het NDW konden hierover geen exacte bedragen worden gegeven door AVV. Wel zijn verhoudingsgetallen bekend. Voor een meetraai van 2x2 stroken ligt de verhouding tussen detectielussen:reistijdcamera's tussen de 1:2 en 1:3. Dit is geldig bij de aanname dat de portalen aanwezig zijn en ook de vereiste stroom- en netwerkvoorzieningen beschikbaar zijn. De verhoudingen zijn zowel voor de eenmalige als de jaarlijkse kosten van toepassing.

Naast AVV zijn er nog andere bronnen [4, 5, 7, 15] die indicaties van de kosten voor beide systemen geven. Deze zijn nogal uiteenlopend maar uitgaande hiervan en de verhoudingen van AVV is een indicatie van de kostprijs (zie tabel 8-5) per meetraai van stroken aangenomen om de kosten per strategie te kunnen bepalen. In dit geval zijn er voor één reistijdtraject op twee locaties camera's nodig. Wanneer dit uitgebreid zou worden met extra aansluitende reistijdtrajecten is per extra traject slechts één extra camerolocatie nodig. Om op dit schaalvoordeel van camerasystemen te anticiperen is de verhouding van 1:3 aangehouden, maar wordt per reistijdtraject één camerolocatie in rekening gebracht. Bij de berekening van de totale kosten is uitgegaan van een looptijd van 10 jaar.

tabel 8-5 Indicatie kostprijs voor 3 stroken voor beide meetssystemen, gebaseerd op verhouding detectielussen:reistijdcamera's 1:3 en verscheidene indicaties [4, 5, 7, 15].

	Detectielussen	Reistijdcamera's
Enmalige kosten	€ 20.000,-	€ 60.000,-
Jaarlijkse kosten	€ 3.000,-	€ 9.000,-
Totale kosten (10 jaar)	€ 50.000,-	€ 150.000,-

Aan de hand van deze kosten kunnen de kosten per kilometer voor de verschillende strategieën worden bepaald. Aangezien deze vergeleken zullen worden met de kosten van de huidige wijze van toestandsbepalen zijn deze ook opgenomen in tabel 8-6. De totale kosten in de tabel gaan uit van de plaatsing van camera's op de twee locaties. Tevens zijn de kosten voor het traject (vanaf de eerste camerolocatie t/m de laatste camerolocatie) gedeeld door de lengte van het reistijdtraject.

tabel 8-6 Indicatie kostprijs per kilometer voor de huidige en additionele situaties de substitutie strategieën voor de aanleg en 10 jaar gebruik van gebruikte meetsystemen.

Strategie	Detectieluslocaties	Trajectlengte (m)	Cameralocaties	Kostprijs per km
H1	40	19700	0	€ 101.523,-
A1	3	1608	1	€ 186.567,-
S1-1	1	1608	1	€ 124.378,-
S1-2	0	1608	1	€ 93.284,-
A2	4	1943	1	€ 180.134,-
S2-1	2	1943	1	€ 128.667,-
S2-2	1	1943	1	€ 102.934,-
S2-3	0	1943	1	€ 77.200,-
A3	5	2528	1	€ 158.228,-
S3-1	2	2528	1	€ 98.892,-
S3-2	1	2528	1	€ 79.114,-
S3-3	0	2528	1	€ 59.335,-
A4	6	3028	1	€ 148.613,-
S4-1	3	3028	1	€ 99.075,-
S4-2	2	3028	1	€ 82.563,-
S4-3	1	3028	1	€ 66.050,-

Zoals ook in hoofdstuk 2 is genoemd, worden de detectielussen niet alleen voor het bepalen van de toestand gebruikt. Vanuit dat perspectief zou het dan ook irrealistisch zijn om de kosten van de detectielussen geheel in rekening te brengen. Daar tegenover staat dat reistijdcamera's ook in staat zijn nog andere aspecten te meten dan alleen reistijdmetingen. Ook hiervan geeft hoofdstuk 2 een aantal voorbeelden. Waaronder herkomst-bestemmingspatronen. Dit zijn waarnemingen die voor veel doeleinden erg nuttig kunnen zijn, maar tot op heden vooral geschat worden en niet gemeten worden. Met dit in het achterhoofd wordt aangenomen dat de meerwaarde van beide systemen voor andere toepassingen gelijk is voor het onderling vergelijken van de meetsystemen.

8.3 Resultaten datafusie: substitutie waarde

Net als bij de kosten zal voor de beoordeling van de kwaliteit van de toestandsbepaling niet naar het gehele netwerk worden gekeken. Zoals in hoofdstuk 7 is gezien is de toestandsbepaling van deelnetwerk 2 uitermate slecht. Naast het feit dat het buiten de directe invloedssfeer van de reistijdmetingen ligt, zouden de resultaten hiervan een vertekend beeld geven waarbij geheel geen onderscheid te maken is. Dit geldt ook voor het gehele netwerk. In bijlage 8 zijn de uitkomsten wel gegeven, maar in dit hoofdstuk is bij de interpretatie en de conclusie alleen gebruik gemaakt van de resultaten van deelnetwerk 1.

Aangezien hier relatief veel toestandsbepalingen (15) betreft zijn deze niet visueel in deze paragraaf opgenomen, maar wordt verwezen naar de bijlage 8.

tabel 8-7 Presteren van strategieën voor deelnetwerk 1 uitgedrukt in de RMSE per criteria ten opzichte van huidige en additionele testresultaten.

Testspecificaties			RMSE (km/u)			
Nr	Traject	Kosten (k€/km)	Totaal	VA	OC	AC
H1.1	-	102	18	9	16	27
A1.1	1608	187	20	11	22	28
S1-1.1	1608	124	20	11	22	28
S1-2.1	1608	93	20	11	22	28
A2.1	1943	180	20	11	22	28
S2-1.1	1943	129	20	11	22	28
S2-2.1	1943	103	20	11	22	27
S2-3.1	1943	77	20	11	22	28
A3.1	2528	158	17	12	19	23
S3-1.1	2528	99	18	12	20	23
S3-2.1	2528	79	17	12	19	23
S3-3.1	2528	59	18	12	20	23
A4.1	3028	148	17	12	19	21
S4-1.1	3028	99	16	12	19	20
S4-2.1	3028	83	16	12	18	20
S4-3.1	3028	66	17	12	19	21

tabel 8-8 Presteren van strategieën voor deelnetwerk 1 per criteria ten opzichte van huidige en additionele testresultaten beoordeeld met behulp van regressie.

Testspecificaties			β				α (km/u)			
Nr	Traject	Kosten (k€/km)	Totaal	VA	OC	AC	Totaal	VA	OC	AC
H1.1	-	102	0,58	0,29	0,58	0,40	28	64	26	32
A1.1	1608	187	0,68	0,13	0,59	0,55	20	81	20	18
S1-1.1	1608	124	0,67	0,13	0,59	0,53	20	82	20	18
S1-2.1	1608	93	0,68	0,13	0,59	0,56	20	82	20	17
A2.1	1943	180	0,69	0,14	0,59	0,57	19	81	20	16
S2-1.1	1943	129	0,69	0,14	0,60	0,57	19	80	19	16
S2-2.1	1943	103	0,69	0,14	0,60	0,58	19	80	19	16
S2-3.1	1943	77	0,68	0,14	0,59	0,56	19	81	20	17
A3.1	2528	158	0,70	0,20	0,62	0,66	21	76	21	15
S3-1.1	2528	99	0,70	0,16	0,60	0,66	21	79	22	15
S3-2.1	2528	79	0,70	0,20	0,62	0,66	21	76	21	15
S3-3.1	2528	59	0,69	0,17	0,59	0,65	21	79	22	15
A4.1	3028	148	0,68	0,18	0,59	0,66	23	77	24	17
S4-1.1	3028	99	0,69	0,18	0,59	0,68	22	77	24	15
S4-2.1	3028	83	0,69	0,19	0,61	0,68	23	76	23	16
S4-3.1	3028	66	0,68	0,18	0,58	0,64	23	77	24	17

Zowel tabel 8-7 als tabel 8-8 geven aan dat het niet veel uitmaakt of, bij gebruik van reistijdmetingen, weinig of veel detectoren genegeerd worden. Dit geldt voor alle afstanden. Hierdoor kunnen dezelfde conclusies worden getrokken als bij de toegevoegde waarde van de bijbehorende afstanden is gedaan. Zo scoren de strategieën met de grootste trajectafstand tegen de verwachtingen in het beste, zie ook hoofdstuk 7. Het enige significante verschil in deze testen zijn de kosten. Deze zijn ook het meest gunstig bij de langste trajecten. Daarom zou op basis van deze resultaten de beste strategie S3-3³⁹ zijn, omdat de gemiddelde fout 18 km/uur is en het slechts € 59.000,- per km voor een periode van 10 jaar kost. Uiteraard gelden ook dezelfde kanttekeningen over de betrouwbaarheid en bruikbaarheid als in het vorige hoofdstuk.

Daarnaast is nog een kanttekening te zetten. Het is namelijk erg vreemd dat er bijna geen verschillen naar voren komen in beide foutmaten. Dit neigt meer naar de conclusie dat de testopzet niet geschikt is om de vervangende waarde van de detectielussen te bepalen. Een reden kan zijn dat van het gehele testnetwerk met 40 detectoren slechts een aantal daarvan zijn vervangen door een reistijdtraject. Een andere oorzaak kan zijn dat de reistijdmetingen zo'n grote (en foute) stempel op het geheel drukken dat de invloed van de detectielussen nihil is.

8.4 Conclusie

Net als bij het aanvullen van detectielusgegevens met reistijdmetingen vallen de resultaten bij het vervangen door de reistijdmetingen tegen. De datafusie levert in het algemeen slechtere toestandsbepalingen op dan wanneer alleen gebruik wordt gemaakt van alleen detectielussen. Hierbij valt op dat, net als bij het aanvullen met reistijdmetingen, de resultaten voor deelnetwerk 1 aanzienlijk beter zijn dan voor het gehele netwerk. Verbetering bij AC (afnemende congestie) is de voornaamste oorzaak dat betere resultaten worden gerealiseerd bij de langere reistijdtrajecten.

Wanneer de testen worden vergeleken met de resultaten uit hoofdstuk 7 blijkt dat het negeren van detectielussen nauwelijks tot andere resultaten leidt. Ook zou het niet veel uitmaken hoeveel lussen verwijderd worden. Gevolg is dat ook voor de vervangende waarde van de reistijdmeting, bij de uitgevoerde testen, de conclusie is te trekken dat de strategieën met langere reistijdtrajecten het beste scoren. Zeker wanneer de kosten worden meegenomen. Deze zijn immers lager bij langere trajecten en het negeren van een toenemend aantal detectielussen. Op basis hiervan zou het advies zijn om lange reistijdtrajecten te gebruiken en zoveel mogelijk detectielussen⁴⁰ te negeren. Dit maakt het mogelijk dat de kosten per kilometer bijna halveren en de kwaliteit voor deelnetwerk 1 nagenoeg gelijk is ten opzichte van het gebruik zonder reistijdmetingen. De verslechtering gedurende VA wordt gecompenseerd door een verbetering gedurende AC. Bij de interpretatie wat dit betekent spelen dezelfde overdenkingen als in het vorige hoofdstuk een rol in verband met het toepassen van de vervanging op een klein deel van het totale netwerk.

De ongevoeligheid voor het aantal detectielussen doet vermoeden dat de testopzet niet geschikt is voor het uitvoeren van deze testen. En dat de conclusie zoals hiervoor is omschreven niet betrouwbaar is. Ook moet beseft worden dat de verbeteringen tussen de testen onderling wellicht een verbetering zijn, maar dat de fouten ten opzichte van de metingen relatief groot zijn. Ook geldt dat de verbeteringen alleen zichtbaar zijn op een deel van het netwerk. De rest van het netwerk scoort juist veel slechter bij het vervangen van de detectielussen door reistijdmetingen. Het is aan te raden om te testen of verbeteringen geboekt kunnen worden wanneer de dekkingsgraad van de reistijdtrajecten over het netwerk 100% is.

³⁹ De reden dat het niet S4-3 is komt doordat deze strategie nog één detectielus bevat binnen het traject en daardoor de kosten opgedreven worden. Wanneer een strategie S4-4 meegenomen zou zijn zonder detectoren op het traject was deze waarschijnlijk als beste naar voren gekomen.

⁴⁰ Uiteraard blijft een deel van de lussen nodig voor andere toepassingen.

9 Conclusie en aanbevelingen

In hoofdstuk 1 zijn drie vragen geformuleerd met betrekking tot de mogelijkheden die reistijdmetingen bieden bij het toestandschatting en onder welke omstandigheden dit optimaal is. In dit hoofdstuk antwoord op gegeven zal worden op de vragen. Het antwoord op de vragen is tweeledig. In paragraaf 9.1 wordt elke vraag beantwoord. Daarna zal in paragraaf 9.2 ingegaan worden op aanbevelingen die volgen uit de conclusie.

Bij ieder van de conclusies dient men te beseffen dat deze geldig zijn in de veronderstellingen dat de uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames kloppen. Bijvoorbeeld dat datacorrectie is toegepast voorafgaand aan het toepassen van het filter en dat men goede informatie heeft over herkomstbestemmingspatronen.

9.1 Conclusie

Hierna wordt per subparagraaf de vragen uit hoofdstuk 1 zo goed als mogelijk beantwoord. Tevens wordt aangegeven onder welke voorwaarden de conclusies zijn getrokken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de ervaringen en resultaten van de verificatietesten uit de voorgaande hoofdstukken.

9.1.1 Vraag 1: Welke aanpak kan worden gebruikt om reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen te fuseren ten behoeve van real-time toestandsbepaling?

Na het formuleren van drie methoden in hoofdstuk 5 is één van hiervan in hoofdstuk 6 uitgewerkt als meest belovende methode. Hierna zal eerst worden omschreven hoe deze heuristiek de datafusie van beide data aanpakt en gebruikt voor het real-time toestandsbepaling. Daarna wordt aangegeven hoe de methode presteert.

De toestandsbepaling wordt gebaseerd op een combinatie van verschillende verkeersontwikkelingen (deeltjes) gedurende een bepaalde periode tot aan het moment van meten. Voor het berekenen van deze deeltjes wordt het macroscopische verkeersmodel Fastlane gebruikt. De deeltjes zijn gebaseerd op de kenmerkende eigenschappen van alle metingen. In dit geval worden deze door de reistijdmetingen bepaald. Deze betrekking op een bepaald traject. De methode gaat er vanuit dat dit hele traject in één zogenaamd deeltje zit. Daarnaast wordt de periode waarvoor het deeltje geldt gebaseerd op de lengte van de reistijdmeting.

De deeltjes verschillen van elkaar doordat ieder deeltje uitgaat van een ander fundamenteel diagram. Per deeltje worden de metingen nagebootst voor vergelijkbare locaties (of trajecten) en tijdstippen als de "werkelijke" metingen. Door per deeltje de nagebootste en de "werkelijke" metingen te vergelijken kan per deeltje een score worden toegekend. De score geeft aan in hoeverre het deeltje de werkelijkheid het beste benadert ten opzichte van de overige deeltjes. Aan de hand hiervan worden de beste parameters van het fundamenteel diagram geschat. Dit wordt bij de volgende filterstap gebruikt. Tevens kan de toestand worden bepaald door het combineren van de (eind)toestanden van de verschillende deeltjes op basis van de scores per deeltje.

Uit de verificatietesten in een eenvoudige testomgeving blijkt dat deze heuristiek een mogelijkheid biedt om de reistijdmetingen en gegevens uit detectielussen te fuseren ten behoeve van real-time⁴¹ toestandsbepaling. De eenvoudige testomgeving houdt in dat het gebruikte netwerk één bottleneck bevat en een referentiesituatie die gecreëerd is met hetzelfde verkeersmodel als in het filter wordt gebruikt. Bij het genereren van metingen is nog wel ruis toegevoegd, maar realistisch is dit niet. Uitgebreidere testen laten zien dat er een aantal aanpassingen ten opzichte van de originele (generieke) opzet nodig bleken.

De belangrijkste aanleiding voor de aanpassingen is dat de methode slecht in staat was om te gaan bij het netwerk uit de casesituatie: de A13 in de richting van Den Haag naar Rotterdam. Naast de problemen door de meerdere bottlenecks is daarbij een referentiesituatie gecreëerd met een ander

⁴¹ Het real-time uitvoeren van de berekeningen is mogelijk aangezien de rekentijd korter was dan de gesimuleerde periode. Het bepalen van een toestand op basis van een set metingen duurt dus korter dan de één minuut. De enige vertraging kan worden veroorzaakt door een vertraging in de beschikbaarheid van de data.

verkeersmodel. Door het gebruik van één fundamenteel diagram leidde een netwerk met meerdere bottlenecks tot onacceptabele resultaten. Dit is verklaard aan de hand van een verkeerskundig verschijnsel: de capaciteitsval. Hierbij neemt de capaciteit van een weg sterk af vanaf het moment dat de congestie begint. Het is aan te raden om bij het bepalen van de verkeersafwikkeling per deeltje rekening te houden met een lokale capaciteitsreductie. Helaas was dit niet mogelijk in de in deze studie gebruikte versie van het 1^e orde verkeersmodel Fastlane. Om toch de toestand goed te kunnen bepalen reageert het filter hierop door het fundamenteel diagram aan te passen. Deze aanpassing bestaat uit het verlagen van de capaciteit. Voor de bottleneck waar de congestie in werkelijkheid optreedt volstaat dit. Maar voor de rest van het netwerk is dit onterecht. Daar is immers nog geen congestie opgetreden en dus ook geen capaciteitsval. Wanneer de vraag relatief hoog is bij potentiële bottlenecks kan dan onterecht congestie ontstaan.

Deze bevinding geeft aan dat de veronderstelling dat één fundamenteel diagram voor het gehele netwerk bij de gebruikte methode irreëel is om de toestand goed te bepalen. Het gebruik van meerdere fundamentele diagrammen zou daarom beter zijn. De opsplitsing van het netwerk in twee delen, zoals gebruikt is bij de verificatietesten met een complexere testopzet, toont aan dat dit zorgt voor een beter toestandsbepaling. Een verdere opsplitsing geeft waarschijnlijk nog betere resultaten, maar is bij het testen uit praktische overwegingen (rekentijd) niet uitgevoerd. Een grote verbetering is waarschijnlijk te behalen wanneer per bottleneck één deelnetwerk, met een eigen fundamenteel diagram, wordt gebruikt. Zo kunnen de effecten door de congestie lokaal worden benaderd en wordt de toestandsbepaling op de rest van het netwerk hier niet door beïnvloed.

Een aandachtspunt bij het opsplitsen is de locatie van de begrenzing van de deelnetwerken. Zo moet deze zo lang mogelijk buiten het invloedsgebied van bottlenecks liggen. Het beste is om deze iets stroomafwaarts van een bottleneck te leggen. Een nadeel bij de gebruikte casestudie is dat op veel links van het netwerk de vraag relatief hoog is. Daarnaast zorgt het gebruik van een 1^e orde verkeersmodel ervoor dat bottlenecks op een andere wijze worden bepaald dan bij de referentiesituatie. Zo zijn er bij de A13 vele potentiële bottlenecks en is het optimaal bepalen van de grens onmogelijk. Daardoor treedt bij het toestandsbepalen in dit onderzoek de congestie bij de tweede bottleneck structureel te vroeg op. Het bepalen van de grens is ook lastig wanneer de locaties van de bottlenecks onbekend zijn of wanneer deze op een onverwachte locatie ontstaan. Zo zal een ongeluk voor ernstige verstoringen kunnen zorgen.

Dit maakt dat de aanpak minder generiek is dan bij de ontwikkeling was bedoeld. De gebruiker moet immers, afhankelijk van de verkeerssituatie, bepalen hoeveel deelnetwerken gebruikt worden en waar de grenzen liggen. Maar de verkeerssituatie is juist onbekend en het is het doel van het filter om deze te bepalen.

		opzet netwerk			
		eenvoudig	complex		
synthetische data gegenereerd met	Fastlane	goed	goed	prestatie schatting parameters	
		goed	matig		
	FOSIM	?	?		prestatie bepaling toestand
		matig	slecht		

figuur 9-1 Prestaties van de methode op het gebied van de parameterschatting en het bepalen van de toestand voor verschillende combinaties van de netwerkopzet en de wijze waarop de synthetische data is gegenereerd. De prestaties van de parameterschatting bij het gebruik van FOSIM data zijn onbekend omdat hier de modelparameters onbekend zijn.

9.1.2 Vraag 2: Welke verbeteringen zijn te behalen bij het gebruik van data uit reistijdcamera's naast de detectielusgegevens?

In hoofdstuk 7 is het proces beschreven om, bij gebruik van de aangepaste methode, antwoord te geven op de tweede vraag. Zoals ook blijkt uit de vraagstelling zou men verwachten dat het toevoegen van reistijdmetingen een verbetering zou betekenen ten opzichte van alleen het gebruik van gegevens uit detectielussen. Bij de uitgevoerde testen is dit echter niet het geval. Slechts voor enkele situaties zijn minimale verbeteringen te behalen.

Om te bepalen of verbeteringen mogelijk zijn is eerst een toestandsbepaling gedaan met het filter⁴² waarbij alleen metingen uit detectielussen gebruikt zijn (huidige situatie). Naast de structurele fout rondom de grens vallen de resultaten tegen. Zo treden gemiddelde fouten op van ongeveer 20 km/uur. Gedurende congestie liggen de fouten zelfs nog hoger. Ook hieruit blijkt dat de gebruikte opzet van het filter (met slechts twee fundamentele diagrammen) verre van optimaal is om toe te passen op de gehele A13.

Ondanks de tegenvallende resultaten van de huidige situatie zijn testen uitgevoerd met gebruik van reistijdmetingen. Wanneer deze worden vergeleken met de huidige situatie zijn een aantal opmerkelijke conclusies te trekken.

Ten eerste geldt dat, bij de gebruikte testopzet, het gebruik van de reistijdmetingen zorgt voor een slechtere toestandsbepaling wanneer men de gehele A13 beschouwt. Zo nemen de gemiddelde fouten tot 100% toe. Dit duidt er op dat de gebruikte methode niet in staat is een voordeel te behalen uit het toevoegen van reistijdmetingen op een deel van het traject. Alleen onder sommige omstandigheden is de methode in staat om kleine verbeteringen te behalen. Zo daalt de fout in de snelheden van de deelnetwerk waarin de reistijdtrajecten zich bevinden. En dan met name wanneer de congestie in de referentiesituatie afneemt en bij het gebruik van langere reistijdtrajecten (2,5 en 3 km). Het is dus interessant om te zien of meer verbeteringen mogelijk zijn bij het toevoegen van reistijdmetingen over de gehele lengte van het traject.

Ten tweede nemen de fouten af naarmate de reistijdtrajecten langer worden. Dit is niet wat men in eerste instantie zou verwachten. Korte reistijdtrajecten leveren immers nauwkeurigere data op. Bij gebruik van de beperkte methode kan dit in grote lijnen op twee (tegenstrijdige) conclusies duiden. Wanneer men immers alleen lokaal kijkt zou men zeggen dat een betere score van toenemende trajectlengte duidt op een relatief optimale situatie bij een lage informatiedichtheid. En dus dat de men het gebruik van reistijden zo beperkt mogelijk dient te houden. Aan de andere kant is een specifiek kenmerk van de uitgevoerde testen dat het netwerk van bijna 18 kilometer slechts één traject van maximaal 3 kilometer bevat. En bij de meest slecht scorende test dat de reistijdmetingen afkomstig zijn van een traject dat zelfs minder dan 10% van het netwerk bestrijkt. Dit kan er op duiden dat reistijdmetingen juist wel een bijdrage kunnen leveren.

Ondanks dit positieve signaal met betrekking tot het gebruik van reistijdmetingen dient men te beseffen dat nagenoeg alle testen in een slechtere toestand resulteerde. Op basis van dit onderzoek is te concluderen dat, bij gebruik van de beschreven methode en testopzet, reistijdmetingen geen duidelijke aanvullende waarde hebben voor het bepalen van de toestand. Hieraan zijn een aantal voorwaarden verbonden. Zo geldt in het geval dat slechts een deel van het netwerk is voorzien van reistijdmetingen, lokaal kleine verbeteringen zijn waargenomen. Het kan niet worden gezegd of deze representatief zijn. Hierdoor is het onmogelijk, om op basis van de uitgevoerde testen, uitspraken te doen over bruikbaarheid van reistijdmetingen voor het bepalen van de toestand. De vraag blijft of de slecht aanvullende waarde wordt veroorzaakt door de opzet van het filter, de testopzet of de door de eigenschappen van reistijdmetingen.

⁴² Dit had ook gekund met een andere filtertechniek, maar dan hadden de verschillen niet alleen door het gebruik van reistijden verklaard kunnen worden, maar ook door de methode en daarmee had de vraag niet beantwoord kunnen worden.

9.1.3 Vraag 3: Wat is de beste strategie bij het vervangen van detectielussen door reistijdcamera's?

Ook voor de derde vraag is uitgegaan van een positieve bijdrage van de reistijdmetingen, bij de gebruikte methode en de testopzet is dit echter niet het geval. Toch is het interessant om te weten wat de gevolgen voor de bepaling van de toestand zijn wanneer de reistijdmeetsysteem niet als aanvulling, maar als vervanging van de detectielussen wordt gezien. Hier spelen ook de kosten een rol die aan beide systemen verbonden zijn. In hoofdstuk 8 zijn hiertoe een aantal strategieën geformuleerd. Deze verschillen in de trajectlengte van de reistijdmetingen, de configuratie van de detectielussen gedurende het traject en uiteraard de kosten per kilometer.

Bij de strategieën worden reistijdmetingen toegevoegd en over het betreffende traject wordt het aantal detectielussen verminderd. Hierdoor zijn dus minder detectielusgegevens beschikbaar die een indicatie (kunnen) geven van de toestand. Men zou dan ook verwachten dat de resultaten een verslechtering zijn ten opzichte van de testen waarbij de reistijdmetingen als aanvulling dienden. De resultaten van de uitgevoerde onderzoeken spreekt deze verwachting echter tegen. Per reistijdtraject zijn de verschillen tussen de strategieën nihil. Volgens de uitgevoerde testen maakt het nauwelijks uit of veel of weinig detectielussen gebruikt worden wanneer men reistijdmetingen heeft: de fout blijft even groot. De kosten per kilometer dalen echter aanzienlijk met een toenemende trajectlengte en een afnemend gebruik van detectielussen. Wanneer alleen naar de scores en kosten van de verschillende strategieën kijkt, zou men concluderen dat de reistijdtrajecten zo lang mogelijk moeten zijn en zo weinig mogelijk detectielussen toegepast moeten worden.

Nog meer dan bij het antwoord op vraag 2 moeten de resultaten echter worden bekeken vanuit het perspectief waarin ze zijn gegenereerd. Alleen al het feit dat de huidige opzet van de methode niet in staat is de aanvullende waarde van reistijdmetingen te benutten maakt de exercitie van het vervangen van detectielussen in wezen zinloos. De uitkomsten dat het voor de kwaliteit van de toestandsbepaling niet uit zou maken hoeveel detectielussen gebruikt worden zijn een indicatie dat de combinatie van de testopzet en de gebruikte methode ongeschikt zijn voor dit deel van het onderzoek. Dit zou immers betekenen dat de langste reistijdafstand het meest optimaal is omdat de kosten per kilometer dan het laagste zijn. Op basis van het uitgevoerde onderzoek is het dan ook onmogelijk om de derde vraag te beantwoorden.

Ook hier is het advies om de testopzet aan te passen en dan met name op het gebied van het aantal reistijdtrajecten. Bij de opzet van dit onderzoek is een eenvoudige testopzet gebruikt. Dit kan wellicht ook verklaren waarom de resultaten nauwelijks van elkaar verschillen. Deels worden de beperkingen opgelegd door de opzet van het filter. Doordat het in deze versie slechts mogelijk is om één reistijdtraject te gebruiken, heeft de substitutie slechts op een (klein) deel van het netwerk betrekking. Wellicht zijn de resultaten heel anders zijn als de hele A13 voorzien wordt van korte reistijdmetingen en alle detectielussen in aanmerking komen om genegeerd te worden.

9.2 Aanbevelingen

Zoals reeds is aangegeven, zijn verbeteringen nodig om betere resultaten te boeken. Uit het onderzoek zijn geen eenduidige antwoorden gekomen over de bruikbaarheid van reistijdmetingen. Wel zijn een aantal inzichten verworven die aanknopingspunten geven voor verder onderzoek. Daarom zullen in deze paragraaf puntsgewijs een aantal aanbevelingen worden gedaan om wellicht het filter te verbeteren en/of meer te kunnen zeggen over het gebruik van reistijdmetingen voor toestandsbepalingen. De eerste subparagraaf gaat in op aanbevelingen om het filter en de opzet van het bepalen van de toestand te verbeteren. In subparagraaf 9.2.2 worden suggesties voor vervolgonderzoek gedaan.

9.2.1 Aanbevelingen met betrekking tot het filter

Uit de testen blijkt dat negeren van de capaciteitsval zorgt voor veel problemen. De meest voor de hand liggende verbetering aan het filter is dan ook het gebruiken van een andere verkeersmodel of een aangepaste versie van het gebruikte Fastlane. Het aanpassen van het fundamenteel diagram is het minste wat moet gebeuren.

Alleen het aanpassen van het verkeersmodel is waarschijnlijk niet voldoende. De oorspronkelijke aanname dat één fundamenteel diagram voor de gehele A13 geldt blijkt niet te kunnen volstaan. Naar aanleiding van de problematiek met de capaciteitsval is dit opgesplitst in twee deelnetwerken met ieder een eigen fundamenteel diagram. Ondanks de verbeteringen bleek dat het wellicht beter is om het netwerk nog verder op te splitsen omdat lokale omstandigheden anders te veel invloed hebben op de toestandsbepaling buiten de voornaamste bottleneck. De huidige opzet laat veel opsplitsingen niet toe waardoor het in deze studie niet verder is onderzocht. Om te bepalen of dit een verbetering kan zijn moeten testen worden gedaan met het verder opsplitsen van het netwerk. Door de rekentijd kan het (nog) niet in werkelijkheid worden toegepast, maar kan het een indicatie geven of het verder opsplitsen een verbetering is. Wanneer dit zo is pleit het er voor om bijvoorbeeld het filter te gebruiken op kortere delen van het netwerk.

Uit de testen met betrekking tot de aanvullende en vervangende waarde blijkt dat de spaarzame verbeteringen alleen optreden in dat deel van het netwerk waar het reistijdtraject in ligt. De testen wijzen uit dat het gebruiken van één enkele reistijdmeting op een klein deel van het netwerk niet voor het gehele netwerk nuttig is. Het is interessant om te kijken of het bij de toepassing van reistijdtrajecten over de gehele lengte van het netwerk wel nuttig is. Met de huidige opzet van het filter is het niet mogelijk om meer dan één reistijdmeting te gebruiken dus zal het filter aangepast moeten worden. Met enige aanpassingen kunnen de extra reistijdmetingen worden gezien als extra databron⁴³. Belangrijk hierbij is dat het filter is gebaseerd op de maatgevende eigenschappen van alle metingen. De periode waarover de deeltjes doorgerekend moeten worden, wordt bepaald door de langste reistijdmeting.

Bovenstaande aspecten kunnen ook gecombineerd worden door per reistijdtraject of bottleneck een aparte toestandsbepaling uit te voeren. Wanneer dit op niveau van de A13 toegepast zou worden, zijn meerdere toestandsbepalingen nodig die onderling communiceren over de vraag en capaciteit op de onderlinge grensvlakken. Verder dient bij de plaatsing van de reistijdcamera's rekening gehouden te worden met de locaties van bottlenecks. Aangezien bottlenecks vaak gevormd worden door opritten is dit goed te combineren met een andere mogelijkheid van meetsysteem. Bij plaatsing rondom een aansluiting kunnen de gegevens ook gebruikt worden voor de het bepalen van herkomstbestemmingsgegevens.

De eerder genoemde aanbevelingen en verbetermogelijkheden gaan uit van (een variatie op) het huidige filter. Een andere mogelijkheid is het gebruik van een andere methode, waarbij ook gekeken moet worden naar de andere methoden uit hoofdstuk 5. Naar aanleiding van dit onderzoek en de tekortkomingen van de gebruikte methode zijn een aantal aanbevelingen te doen.

Het eerste nadeel van het huidige filter is dat het, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een Kalman filter, geheel vertrouwt op het gebruikte verkeersmodel. Er wordt immers gekozen uit een combinatie van de verkeersafwikkelingen die het model voorspelt. En is er geen directe relatie tussen de metingen en de parameters, laat staan tussen de metingen en de toestandsbepaling. Zelfs wanneer niets van de verkeersafwikkelingen van alle deeltjes zou kloppen wordt de minst slechte gekozen. Terwijl het in dergelijke gevallen beter kan vertrouwen op de metingen. De reden dat dit bij het huidige filter niet gebeurt, is dat het (voorsnog) erg lastig is om de reistijdmeting te vertalen naar één toestand. Alleen bij het gebruik van detectielussen is dit mogelijk, maar het was juist een vraag om deze (deels) te vervangen door reistijdmetingen.

Een ander aspect is dat de gebruikte formules voor het bepalen van de scores per deeltje gebaseerd zijn op het uitgangspunt dat meest realistische verkeersontwikkeling de hoogste score krijgt. Voor de formules is geen theoretische achtergrond. Door de score af te laten hangen van de toestand en de gevoeligheid van de metingen voor deze toestanden is wellicht een beter resultaat te behalen. Ook het opnemen van een indicatie hoeveel de toestand afwijkt in plaats van alleen het maken van een ranking tussen de deeltjes biedt mogelijkheden.

⁴³ Het is dan af te raden om alle metingen te combineren, zoals bij detectielussen, aangezien de reistijdmetingen betrekking kunnen hebben op verschillende intervallen voor de dimensies (trajectlengte, periode van meten).

Tot slot zou men moeten verifiëren in hoeverre de aannames correct zijn. Een voorbeeld hiervan zijn de foutverdelingen die gebruikt zijn bij het creëren van de synthetische data. De foutverdelingen zijn tevens gebruikt om de metingspecifieke bijdrages te bepalen, eventueel is dit niet optimaal.

9.2.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Uit de conclusie in paragraaf 7.3 blijkt dat het relatief goed scoren van lange reistijdtrajecten zowel kan duiden op een positieve bijdrage als een negatieve bijdrage van reistijden. Als eerste zal dan ook onderzocht moeten worden of het relatief goed scoren van langere reistijdtrajecten komt door de hogere dekkingsgraad of de onbruikbaarheid van reistijdmetingen bij het bepalen van de toestand. Hiervoor zijn echter wel aanpassingen aan het filter en/of de opzet van de testen nodig aangezien bij de huidige opzet slechts één reistijdtraject gebruikt kan worden. Zo kan het gehele traject worden voorzien van reistijdmetingen of moet worden gewerkt met een kleiner netwerk dan de gehele A13. Mocht blijken dat reistijdmetingen op een aanvullende wijze kunnen worden toegepast, dan is het interessant om een antwoord te geven op de vraag: "Wat zijn de optimale omstandigheden om detectielusgegevens te vervangen door reistijdmetingen?".

Uitgaande van een positieve bijdrage zijn bij dit onderzoek een beperkt aantal mogelijke situaties onderzocht. Zo is in dit onderzoek is uitgegaan van bekende bottlenecks en logische verkeersontwikkelingen. Dit is niet wat in werkelijkheid gebeurt. Een interessante onderzoeksvraag is dan ook: "Hoe presteert het filter bij het optreden van bottlenecks op onverwachte locaties?". Zoals in het geval van een ongeluk.

Of een file die door een externe bottleneck plaatsvindt. In het geval van de A13 is dit bijvoorbeeld een file op de A20 richting het oosten die zijn weerslag heeft op de doorstroming van de A13. Hoewel dit in het onderzoek niet genoemd is, zijn wel enkele testen gedaan hoe het filter hierop reageert. In dergelijke gevallen treden nog veel grotere problemen op dan bij de twee interne bottlenecks. Een verklaring hiervoor is dat nog geen verkeerskundige reden is binnen het netwerk congestie te laten beginnen op het moment dat de externe bottleneck file veroorzaakt op de A13. Het filter heeft dan ook geen andere mogelijkheid dan de capaciteit flink verlagen totdat congestie ontstaat. Uiteraard is dit niet wat er aan de hand is, er is immers een beperking van de uitstroom aan de rand van het netwerk, maar met de huidige methode kan dit niet bepaald en correct aangepast worden. Doordat één fundamenteel diagram wordt gebruikt voor het hele netwerk ontstaan ook op vele andere locaties onterechte files.

Mocht blijken dat de vervanging van een groot deel van de lussen mogelijk is door gebruik te maken van reistijdmetingen dan dient men tevens te onderzoeken in hoeverre de reistijdcamera's gebruikt kunnen worden om intensiteiten te bepalen. Dit is namelijk een essentiële eigenschap van detectielussen die bij andere doeleinden dan toestandsbepaling wordt gebruikt. Wanneer dit het geval is, kan pas echt worden gesproken over vervanging van het detectielussen meetsysteem. Hierbij moet worden opgemerkt dat in plaats van vervanging van het meetsysteem met detectielussen een herverdeling beter is. Zo is in dit onderzoek uitgegaan dat men exact weet wat de verkeersvraag op de randen van het netwerk is. Vaak is dit echter niet het geval. Daar zouden (enkele) detectielussen voor gebruikt kunnen worden door te meten hoeveel verkeer het netwerk op komt.

De kracht van het filter is dat het principe zou moeten werken bij elk soort data. De voorwaarde is dat het na te bootsen is aan de hand van het verkeersmodel. Zo zou het interessant zijn om te kijken of het mogelijk is om de snelheden uit het MoniCa-meetsysteem gebruikt kunnen worden. De vraag is dan ook: "Kunnen in plaats van harmonisch gemiddelde snelheden, rekenkundig gemiddelde snelheden gebruikt worden?". Momenteel is het zo dat de MoniCa-data gecorrigeerd moeten worden tot een harmonisch gemiddelde op basis van een aantal aannames wat voor mogelijke fouten zorgt.

Door te meten aan de hand van kentekenherkenning kunnen ook nieuwe soorten data worden toegepast. Zo kunnen gebruikersklasse specifieke metingen worden gebruikt. Een voorbeeld zijn opleggers waarvan het nummerbord met een "O" begint. Per deeltje kunnen voor de bijbehorende klassenspecifieke reistijden nagebootst worden en vergeleken worden met de reistijdmetingen van alle nummerborden beginnend met de "O". Hiervoor is het wel vereist dat een multiuserclass model (zoals Fastlane) gebruikt wordt.

Referenties

Let op: toevoegen bron door eerst tekst te schrijven en daarna via opsomming zorgen dat nummer voor komt, anders gaat fout met verwijzing.

1. AVV, *Beschikbaarheid meetnetten*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Adviesdienst Verkeer en Vervoer, geraadpleegd in mei 2007, <http://81.18.1.211/arcimssite/meetnet/viewer.htm>
2. AVV, *Snelhedenkaart*, Ontwikkeld door Goudappel Coffeng in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Adviesdienst Verkeer en Vervoer, geraadpleegd in mei 2007, <http://www.maximumsnelheden.nl>
3. AVV, TU Delft, *FOSIM 5.1*, applicatie, 2006, Laboratorium voor Verkeerskunde van de Technische Universiteit Delft in opdracht van de Adviesdienst voor Verkeer en Vervoer van Rijkswaterstaat
4. AVV, *Monitoring ten behoeve van reistijdinformatie*, Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 2006
5. Deckers, L.H.G.M., *Monitoring Rotterdam*, Gemeente Rotterdam, dS+V, presentatie DVM congres 2007, bijbehorende paper is gepubliceerd in 2007, <http://www.dvm-congres.nl/papers2007/Deckers%20mm1.pdf>
6. Google, *Google Earth 4.0.2091 (beta)*, applicatie, 2006
7. Website Handboek Regionale Verkeersmonitoring | Inwinnen, *Verkeersmonitoring d.m.v. kentekenherkenning*, in opdracht van RWS AVV, geraadpleegd in mei 2007, gepubliceerd in 2007, http://verkeer.wikia.com/wiki/Verkeersmonitoring_d.m.v._kentekenherkenning
8. Website Handboek Regionale Verkeersmonitoring | Inwinnen, *Verkeersmonitoring met detectielussen*, in opdracht van RWS AVV, geraadpleegd in mei 2007, gepubliceerd in 2007, http://verkeer.wikia.com/wiki/Verkeersmonitoring_met_inductielussen
9. Hoogendoorn, S.P., Hegeman, G. en Dijker, Th., *Traffic Flow Theory and Simulation*, dictaat CT4821, Technische Universiteit Delft – Transport & Planning, 2004
10. Hoogendoorn, S.P., Van Lint, J.W.C. en Hoogendoorn-Lanser, S., *A First-order heuristic for Traffic Datafusion: Application tot Fusing Inductive Loops and Travel Time Camera Data*, nog niet gepubliceerd.
11. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, *Nota Mobiliteit*, 2004
12. Website Nationaal Datawarehouse, *Nationaal Datawarehouse*, geraadpleegd in juli 2007, <http://www.nationaaldatawarehouse.nl>
13. Projectteam NDW, *Het Nationaal Datawarehouse uitgelegd*, brochure over het NDW via website Nationaal Datawarehouse, geraadpleegd in juni 2007, gepubliceerd in 2006 http://www.nationaaldatawarehouse.nl/library/File/Brochure_NDW.pdf
14. Van Lint, J.W.C. en Miska, M., *Evaluatie en Analyse Reisinformatie*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 2006, Technische Universiteit Delft.
15. Van Lint, J.W.C. en Hoogendoorn, S.P., *De mogelijkheden van datafusie*, september 2006, artikel NM Magazine nummer 3 p22-27.
16. Wang, Y en Papageorgiou, M., *Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a general approach*, 2005, Transportation Research Part B 39 p141–167
17. Van Zuylen, H.J., Van Lint, J.W.C., Hoogendoorn, S.P., Bliemer, M., Muller, Th.H.J., Chen, Y.S., Taale, H. en Zuurbier, F., *ITS and Dynamic Traffic Management*, dictaat CT5804, Technische Universiteit Delft – Transport & Planning, 2005/2006

BIJLAGEN

1 Basisnetwerk NDW

categorie

— Kwaliteitsniveau 1

— Kwaliteitsniveau 2

— Kwaliteitsniveau 3



2 Afweging methoden

Hierna zal per methode uit hoofdstuk 5 een korte omschrijving van de voor- en nadelen gegeven worden. op basis hiervan is in paragraaf 5.4 een keuze gemaakt voor één van de methoden. Daarbij is op de volgende punten gelet:

1. Wat is de invloed van weinig MoniCa-meetpunten?
2. In welke mate is een databasestructuur met nadeel een lange verwerkingstijd?
3. Gevoeligheid voor (foutieve) parameterwaardes, aannames over foutverdelingen van de databronnen etc.
4. De eenvoud van implementatie en inzichtelijkheid van de methode.
5. De mate waarin de methode uitgebreid kan worden met andere databronnen.
6. Hoe adaptief is de methode voor wisselende omstandigheden (congestie, weersinvloeden)?
7. De gevoeligheid voor foute metingen.

Voor- en nadelen methode 1: Instantane trajectoriën met Kalman filter

Het voordeel van deze filtertechniek is dat, ondanks de historische aard van de meting, geen database bijgehouden hoeft te worden met historische gegevens van de toestand. Zo kan dus een Kalman filter, of elk ander filter dat hoort bij een verkeersmodel, gebruikt worden zonder aanpassingen. Ook zou deze filtertechniek met gebruik van reistijden mogelijk het slechte presteren van schatters op basis van enkel snelheid [14] bij (matige) congestie kunnen voorkomen. Bij deze zogenaamde V-schatters nemen de prestaties af naarmate de snelheid daalt.

Daartegenover staat dat de techniek een grove schatting kan zijn in het geval van op- of afbouwende congestie. Het staat of valt bij de mate waarin de aanname van een stationaire situatie ten opzichte van de voorgaande tijdstappen geldig is. Een ander nadeel is dat het niet mogelijk is om per databron een toestandschatting te generen om zo de verschillende bronnen te kunnen vergelijken. Tevens is alleen correctie mogelijk voor het deel netwerk dat is voorzien van een reistijdtraject. Aangezien er wordt gewerkt met een KF moet de verdeling van de fout normaal verdeeld zijn.

Voor- en nadelen methode 2: Historische trajectoriën met Kalman filter

Doordat voor reistijden niet wordt gekeken naar alleen de toestand op het moment van meten, zoals bij methode 1, is dit realistischer. Toch is het model nog vrij snel, omdat maar een beperkt aantal berekeningen gedaan hoeft te worden per filterstap.

Wanneer tussentijds de modelvoorspellingen ook bewaard moeten worden, is een uitgebreide database opzet nodig. Wanneer men echter volledig vertrouwt op de metingen, zal dit beperkt zijn. De keerzijde hiervan is dat de modelvoorspelling volledig worden gecorrigeerd op basis van de metingen. De verkeerskundige kennis die is vertaald in het verkeersmodel wordt hierbij in wezen genegeerd als databron. Ook is een nadeel dat deze methode erg toegespitst is op het gebruik van reistijdmetingen. De datafusie met andere databronnen is niet zomaar mogelijk. Tevens werkt de aanpak waarschijnlijk slecht bij weinig detectoren. Dit heeft een negatief effect bij het bepalen van de vervangende waarde.

Voor- en nadelen methode 3: Parameterschatting op basis van een deeltjesfilter

Door de simultane opzet is de verwerking van de ene databron onafhankelijk van de andere databron. De methode kan ook werken wanneer één van de databronnen geheel ontbreekt. Ook maakt de opzet het gebruik van andere bronnen voor de datafusie mogelijk. Zolang de metingen maar na te bootsen zijn op basis van gegevens uit het verkeersmodel.

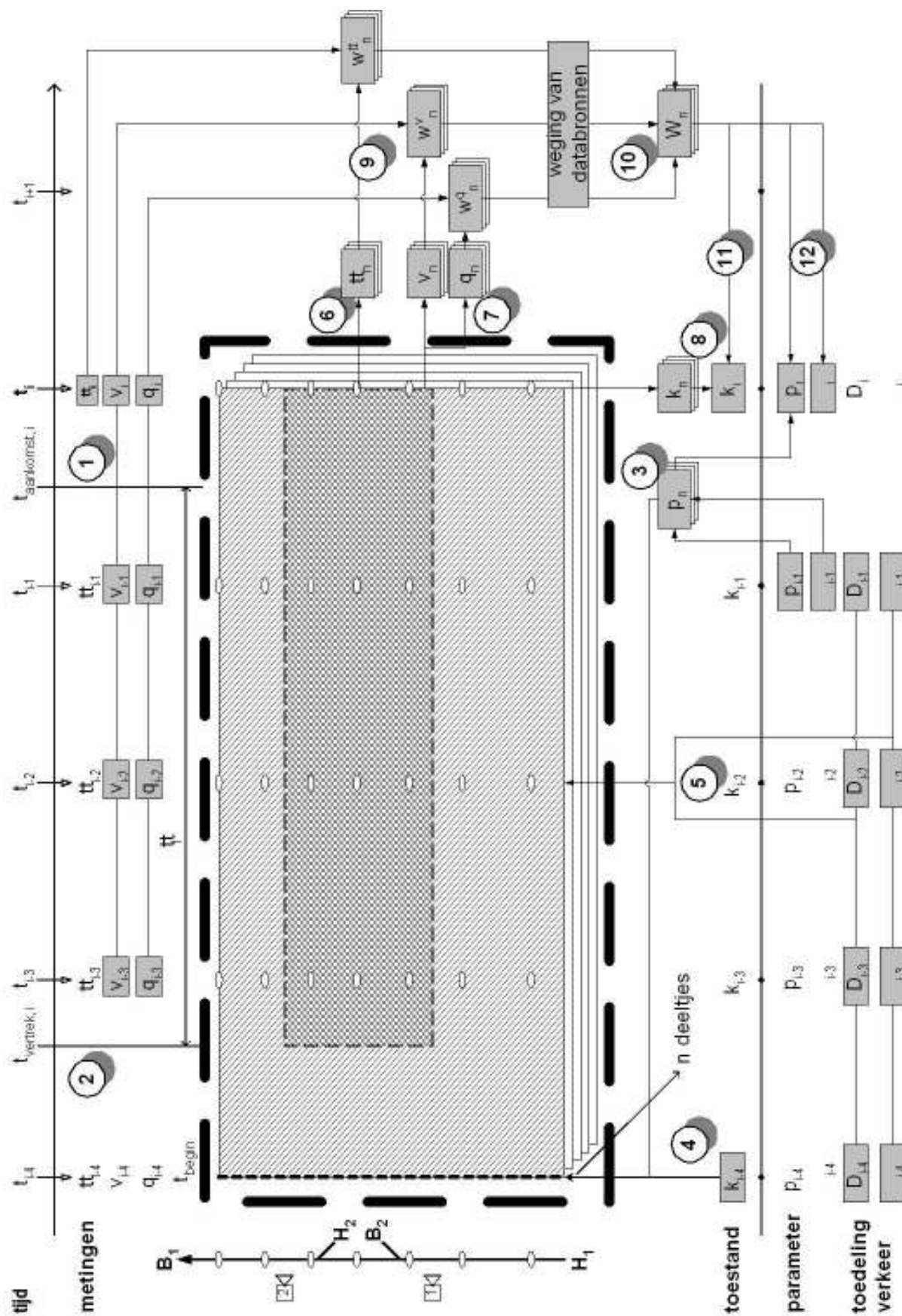
Doordat de parameters geschat worden is dit een gevoelig punt van de aanpak. Een groot nadeel van deze aanpak is dat een uitgebreide database structuur vereist met onder andere alle voorgaande toestandsbepalingen. Samen met de vele berekeningen die per filterstap uitgevoerd moeten worden maakt dat de aanpak relatief traag is en wellicht ook beperkt wordt in de toepassing.

Hierna staan de resultaten zoals die ook in paragraaf 5.4 zijn genoemd en waarop de keuze is gebaseerd om met de derde methode door te gaan.

	Instantaan trajectorien met Kalman filter	Historische trajectorien met Kalman filter	Parameter- schatting obv deeltjesfilter
Afhankelijkheid van MoniCa-meetpunten	o	-	+
Databasestructuur nodig	+	o	-
Gevoeligheid parameterwaardes, aannames	o	o	+
Eenvoud en inzichtelijkheid	+	-	o
Uitbreidbaarheid met andere bronnen	-	-	+
Adaptief vermogen wisselende omstandigheden	-	o	o
Gevoeligheid foute metingen	-	o	o

+ = goed
o = matig
- = slecht

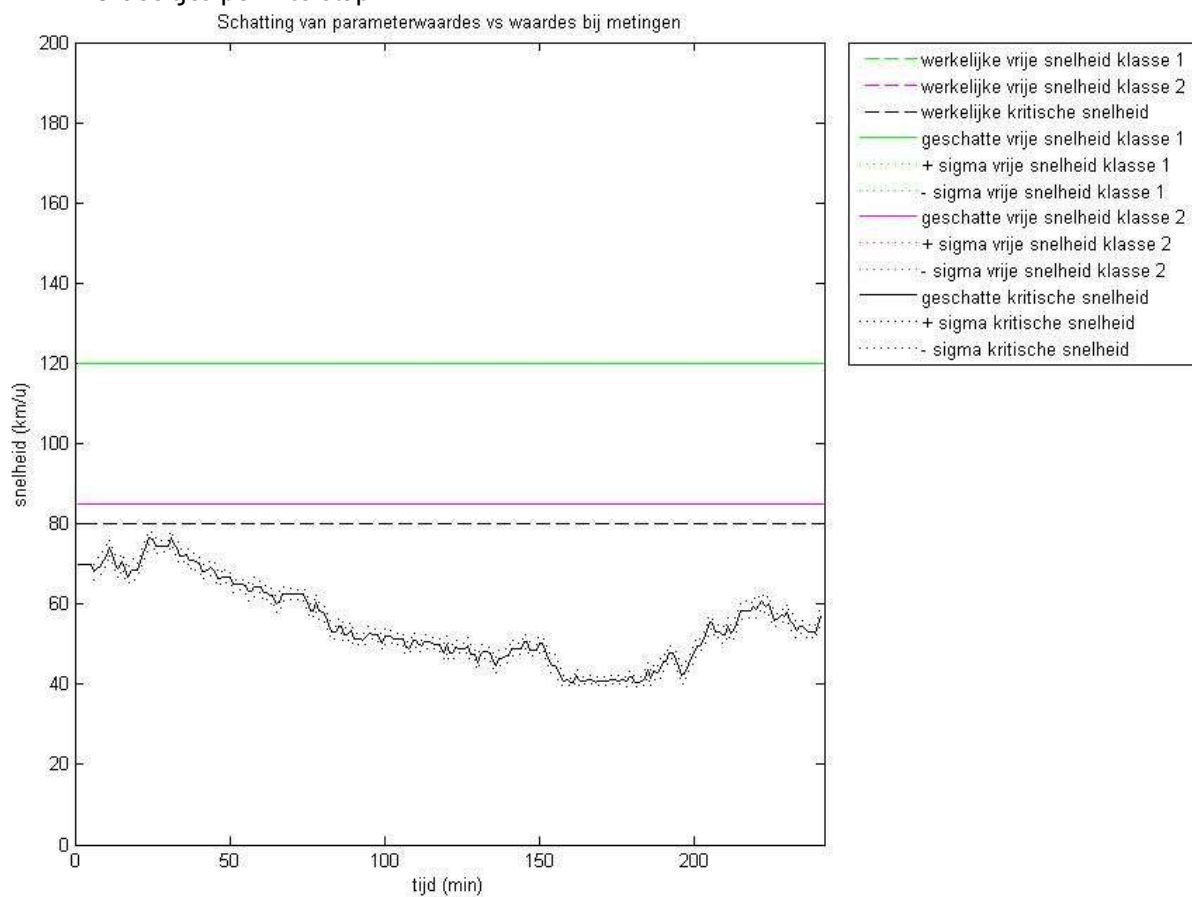
3 Schema filter: raamwerk en kern

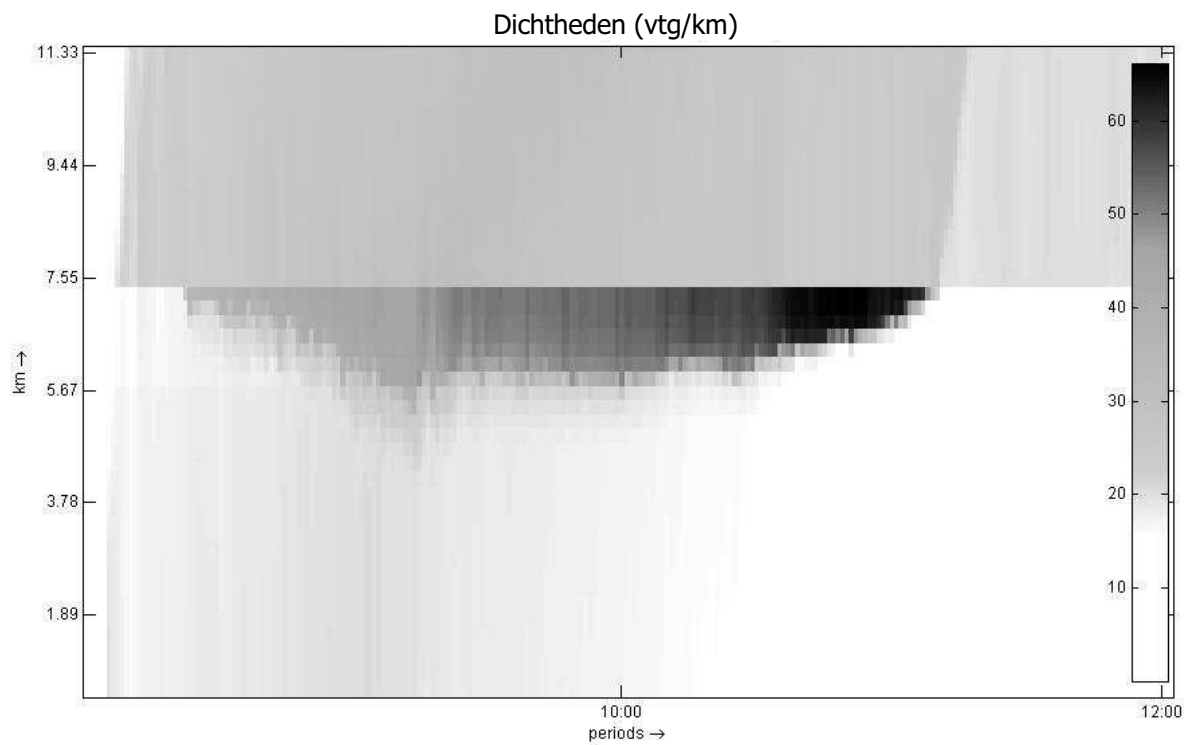
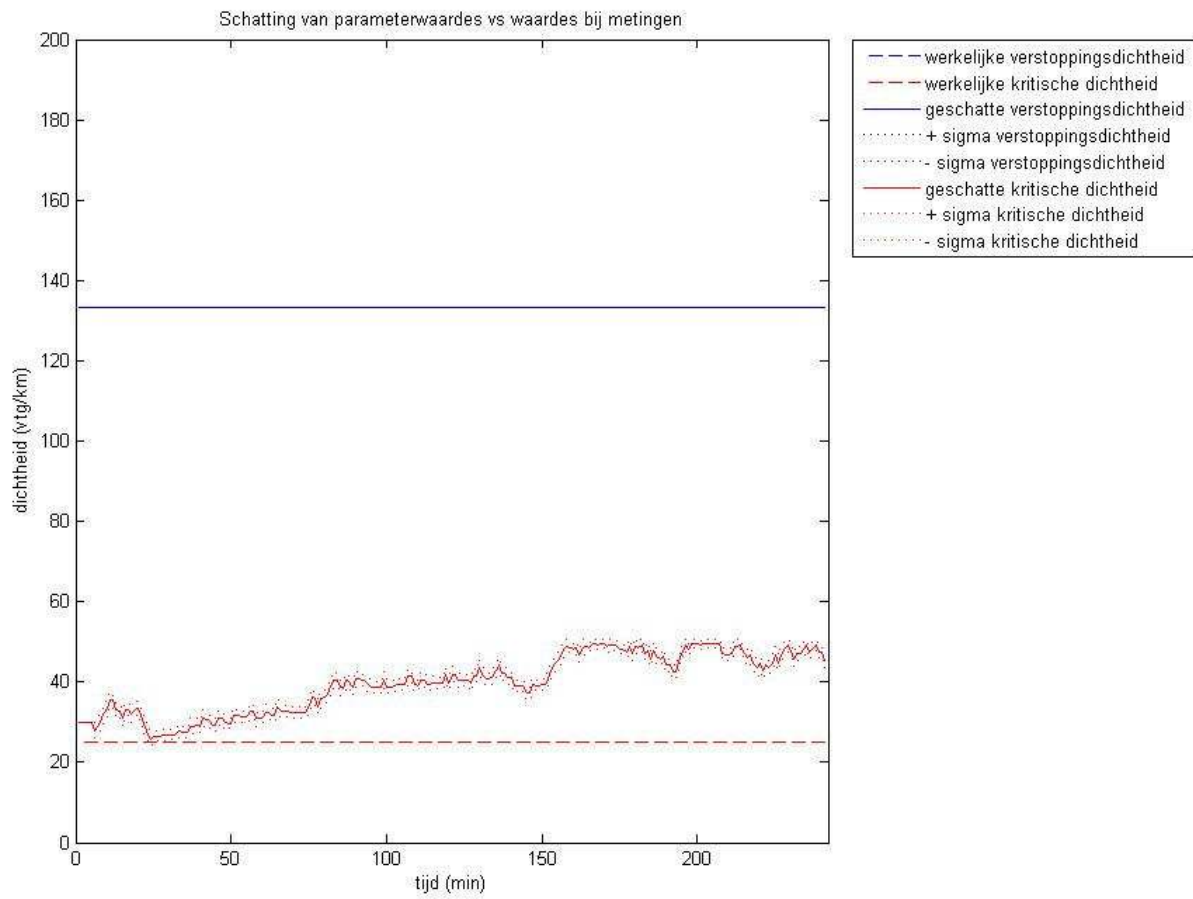


4 Resultaten verificatie testsoort 3

Test 3a

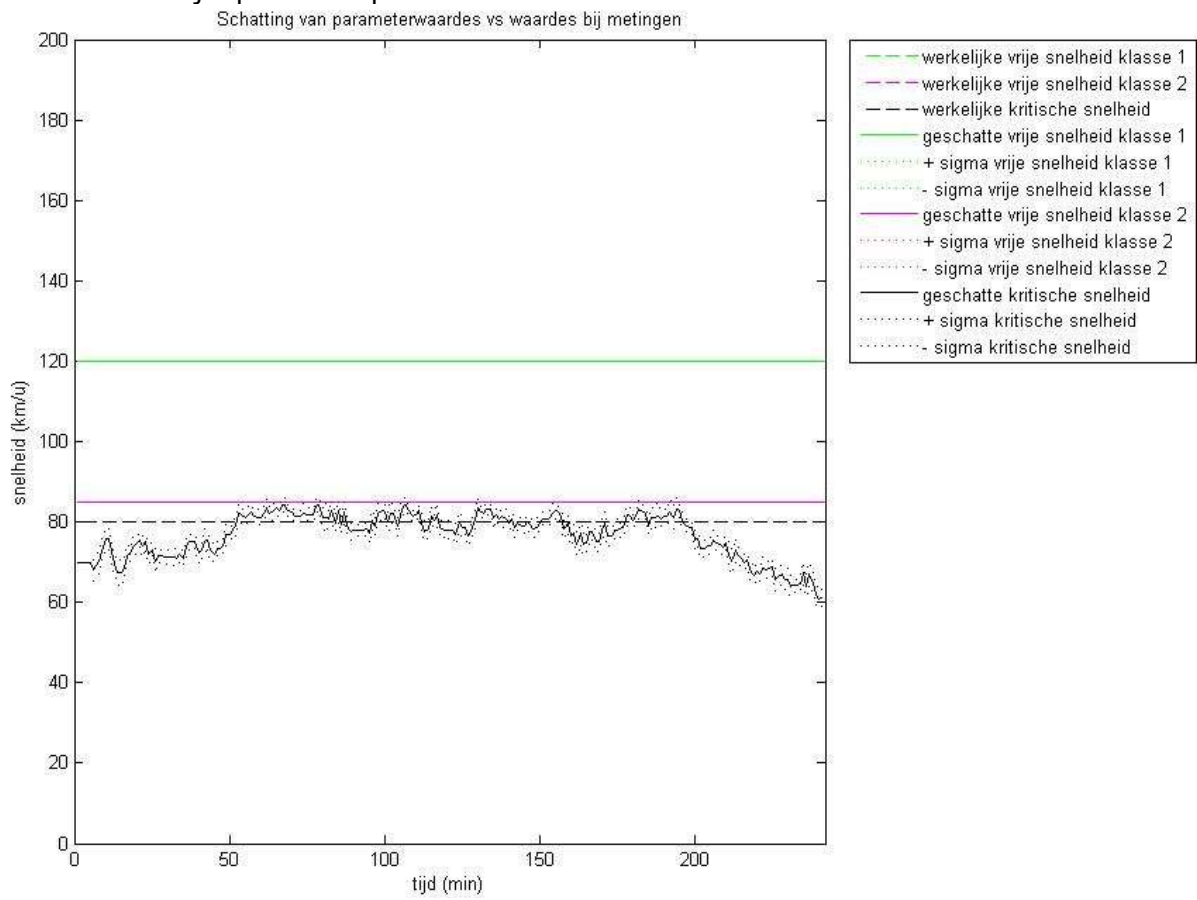
- parameterschatting van de kritische snelheid (v_C) en kritische dichtheid (k_C)
- per filterstap drie waarden per parameter
- 9 deeltjes per filterstap

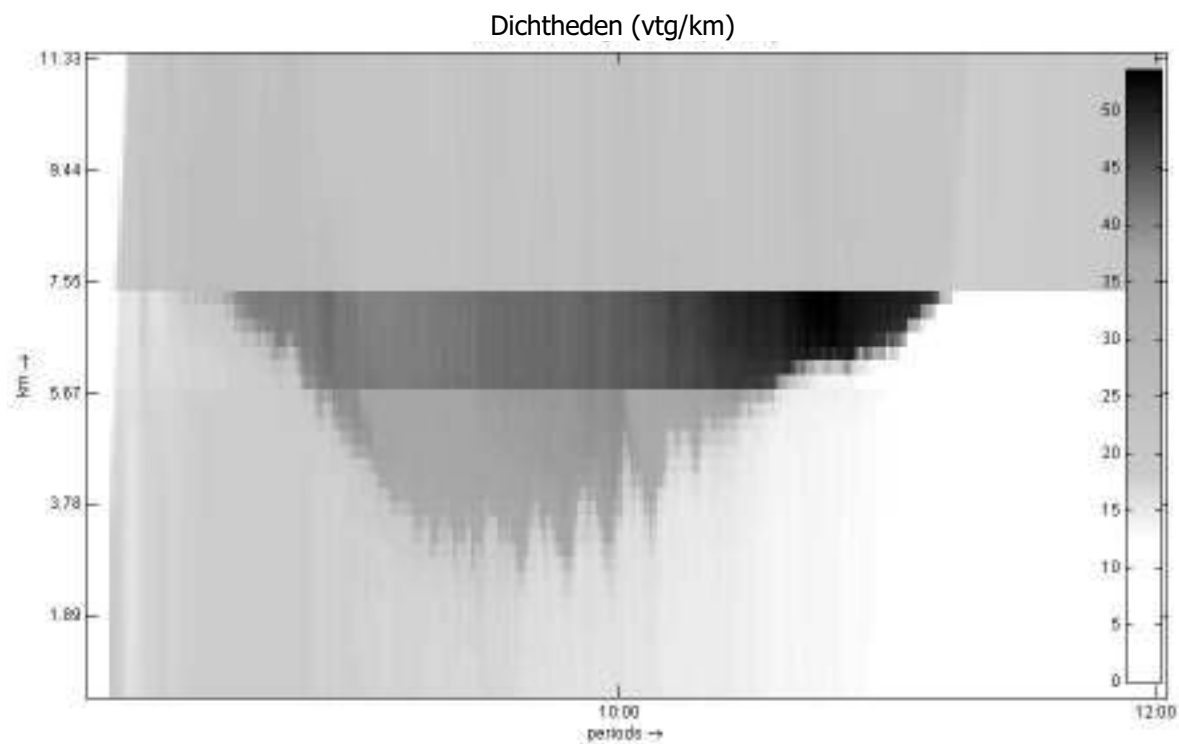
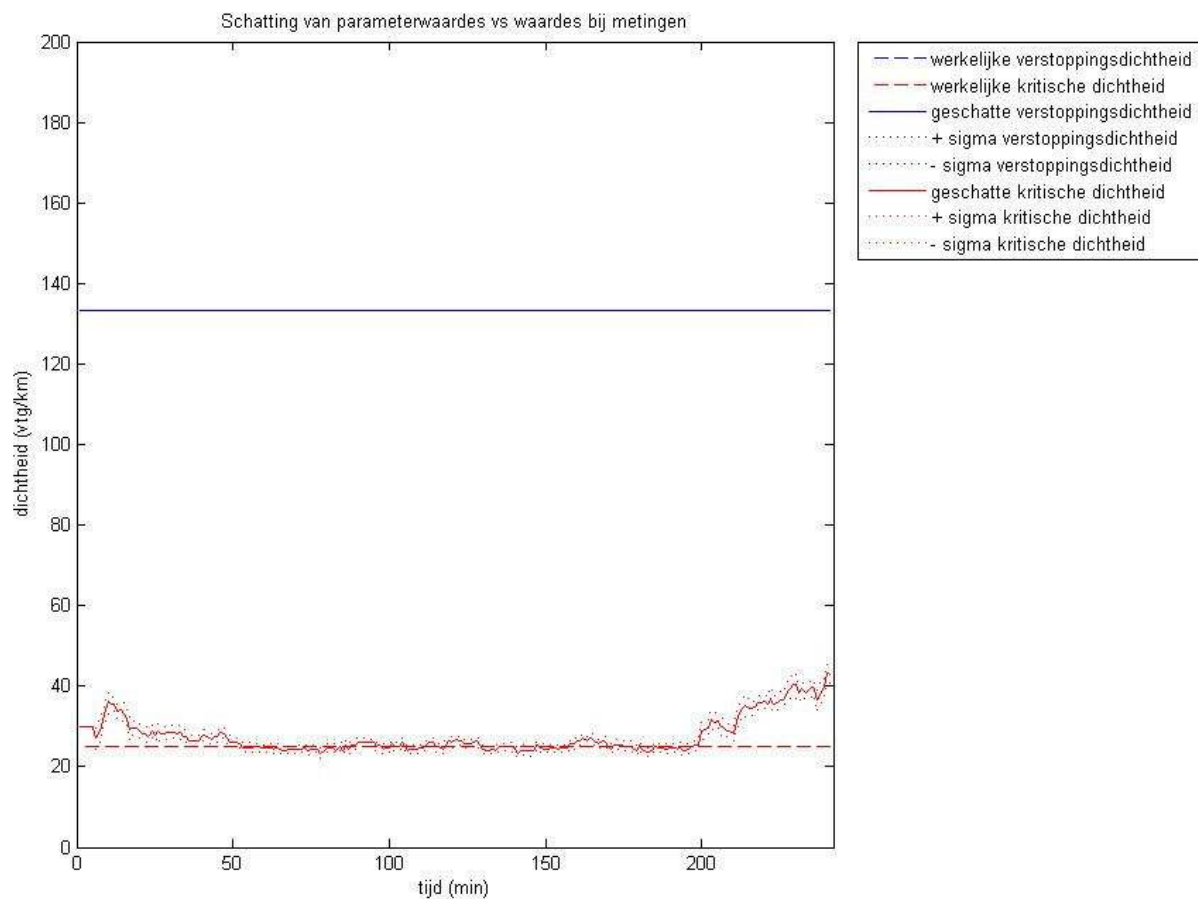




Test 3b

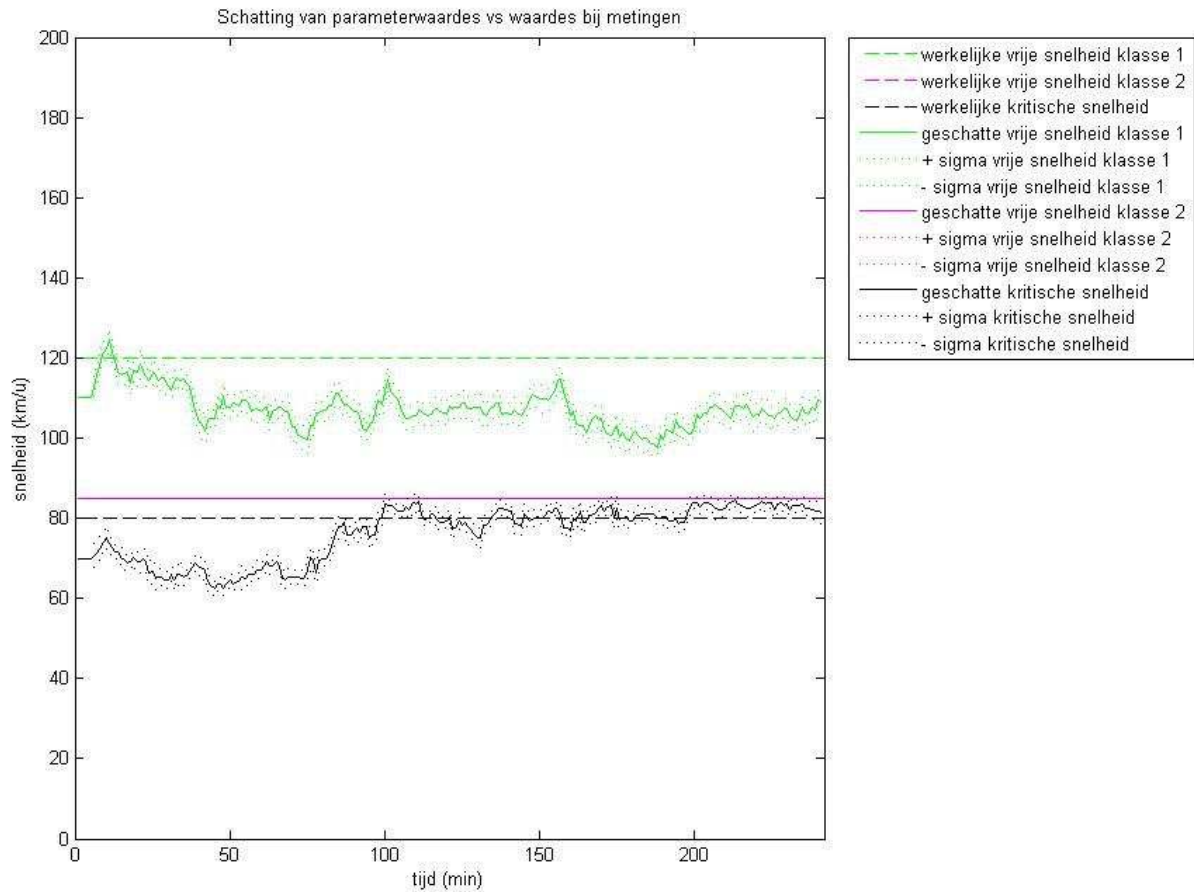
- parameterschatting van de kritische snelheid (v_C) en kritische dichtheid (k_C)
- per filterstap vijf waardes per parameter
- 25 deeltjes per filterstap

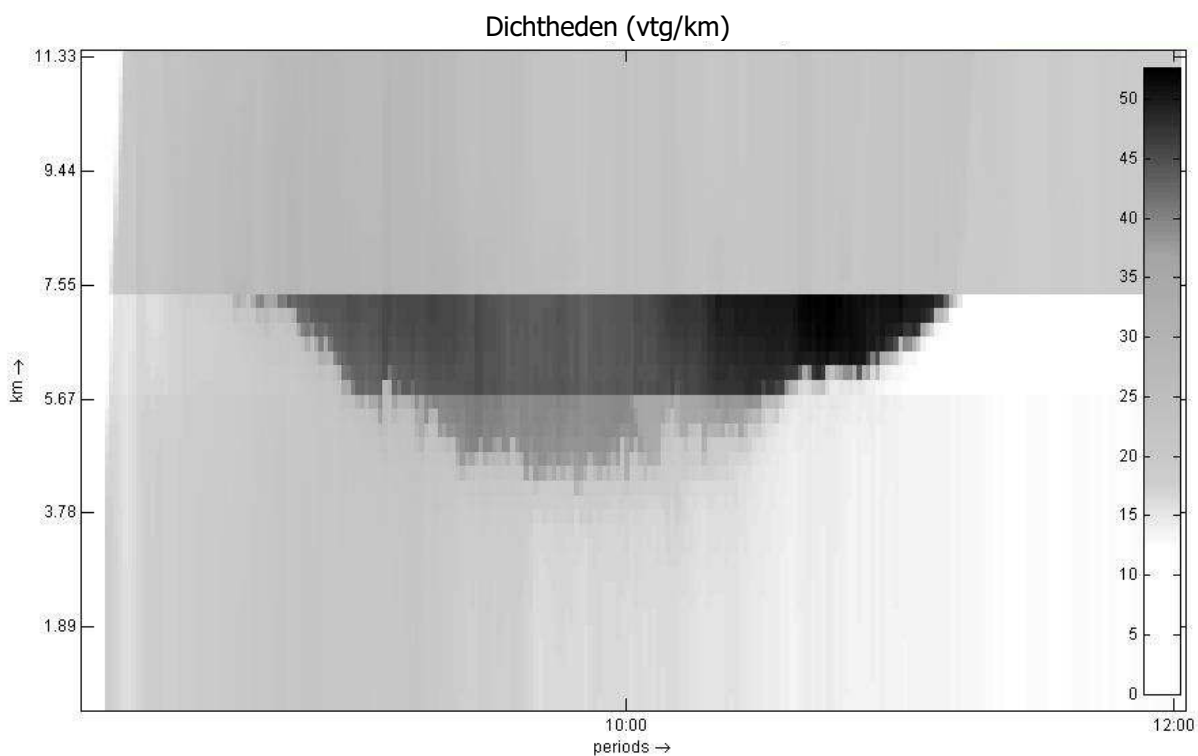
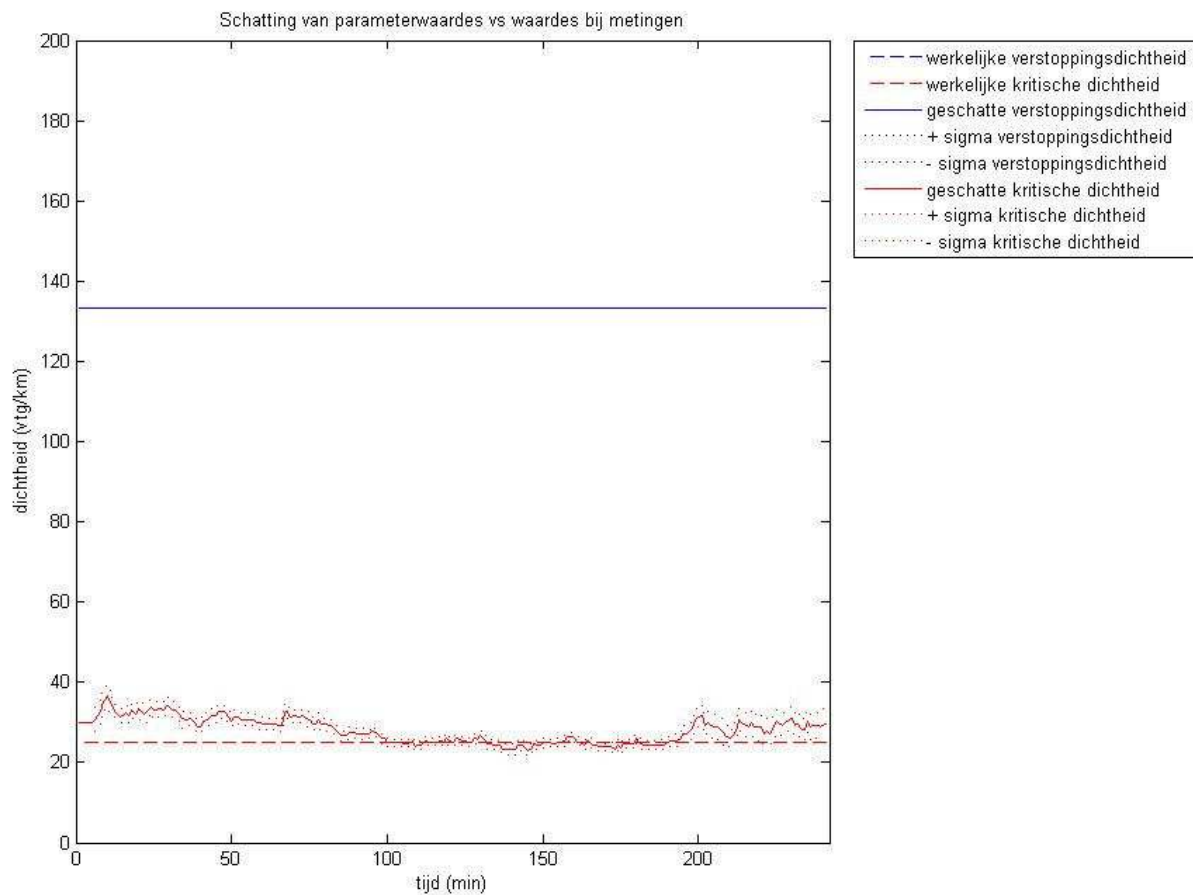




Test 3c

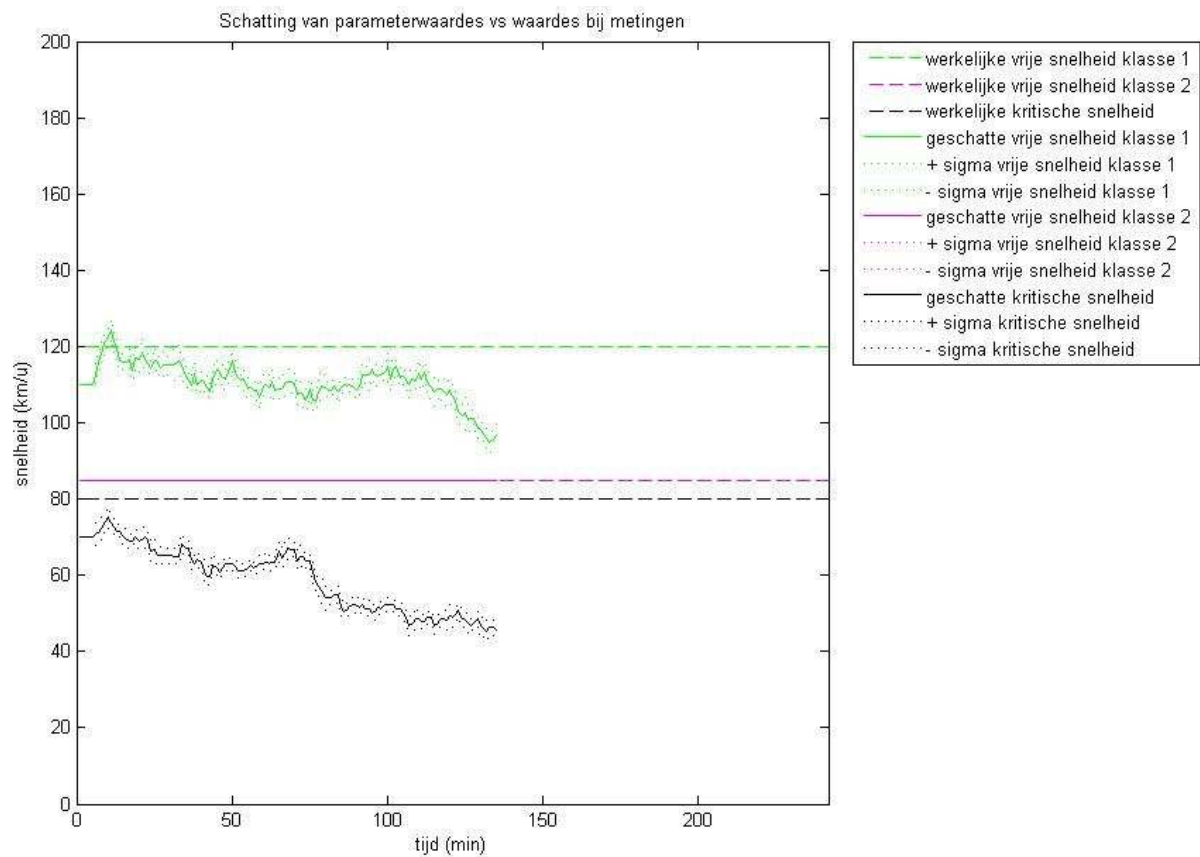
- parameterschatting van de kritische snelheid (v_C), kritische dichtheid (k_C) en snelheid bij vrije afwijking voor gebruikersklasse 1 (v_{0_1})
- per filterstap vijf waarden per parameter
- 125 deeltjes per filterstap

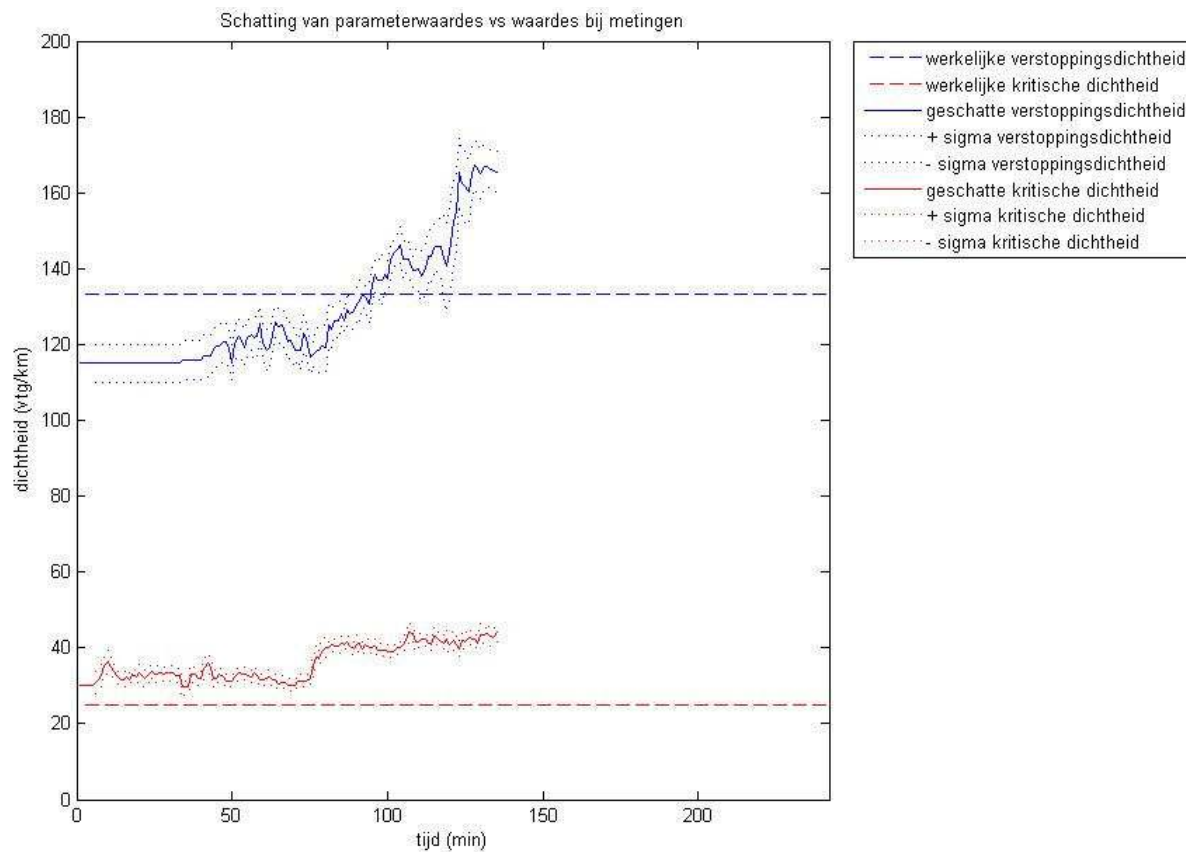




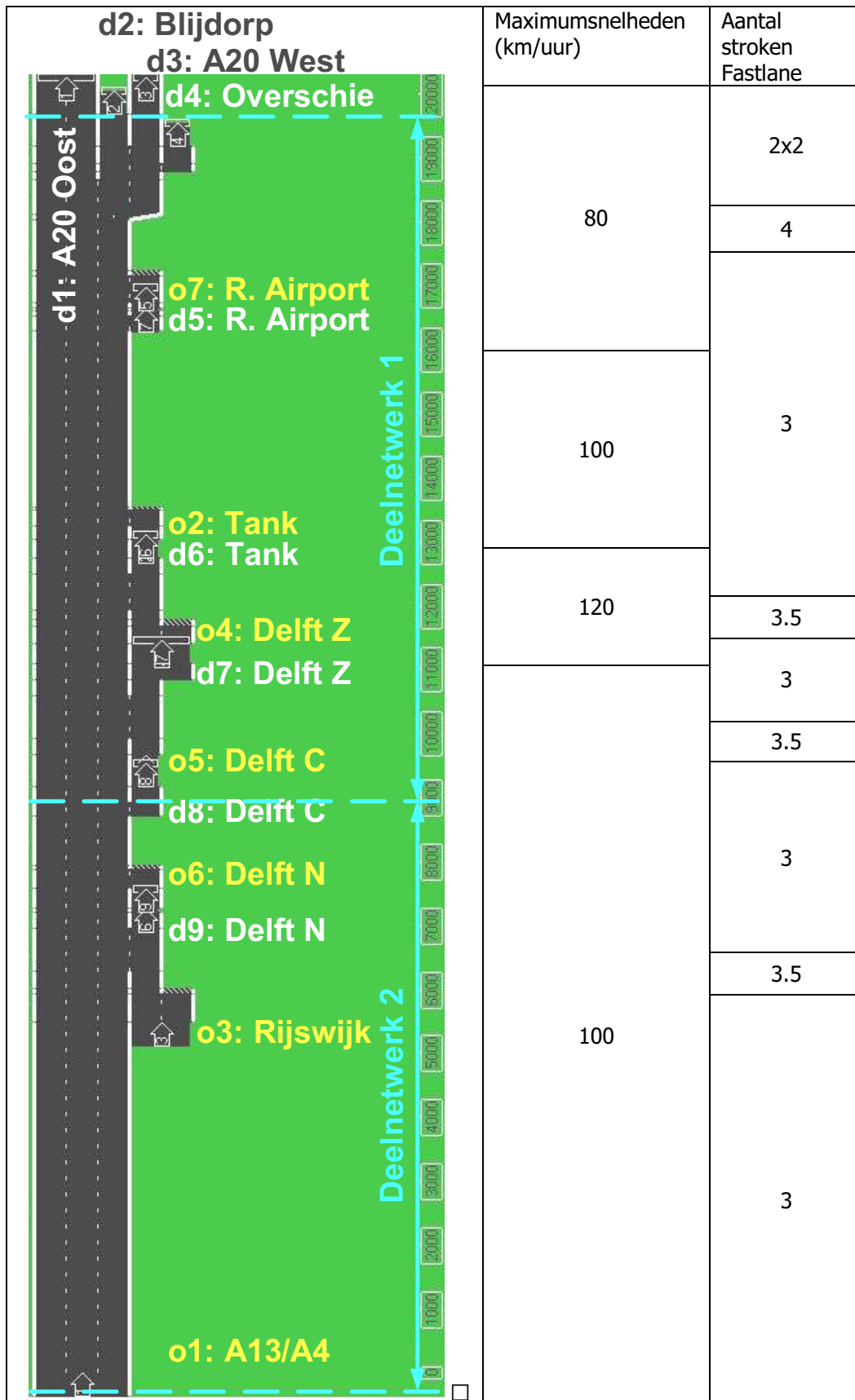
Test 3d

- parameterschatting van de kritische snelheid (v_C), kritische dichtheid (k_C) en snelheid bij vrije afwijking voor gebruikersklasse 1 (v_{0_1}) en de stremmingsdichtheid (k_{Jam})
- per filterstap vijf waardes per parameter
- 625 deeltjes per filterstap (tevens de oorzaak dat de schattingen niet voltooid zijn door de enorme rekentijd)

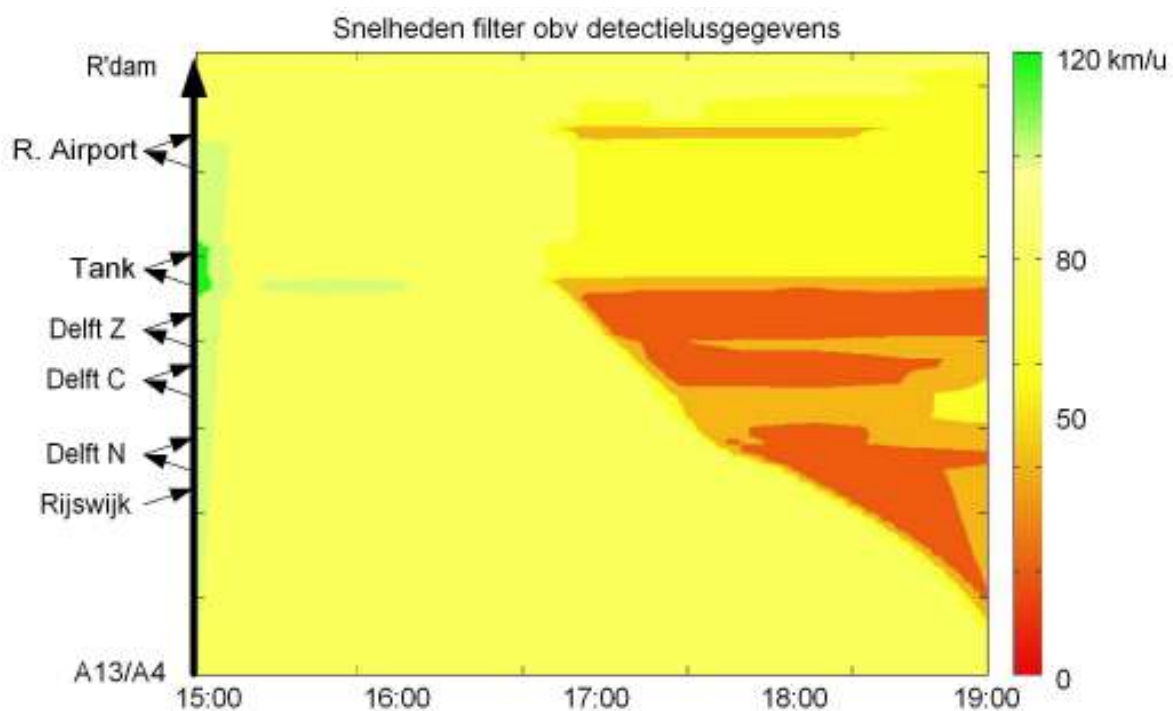
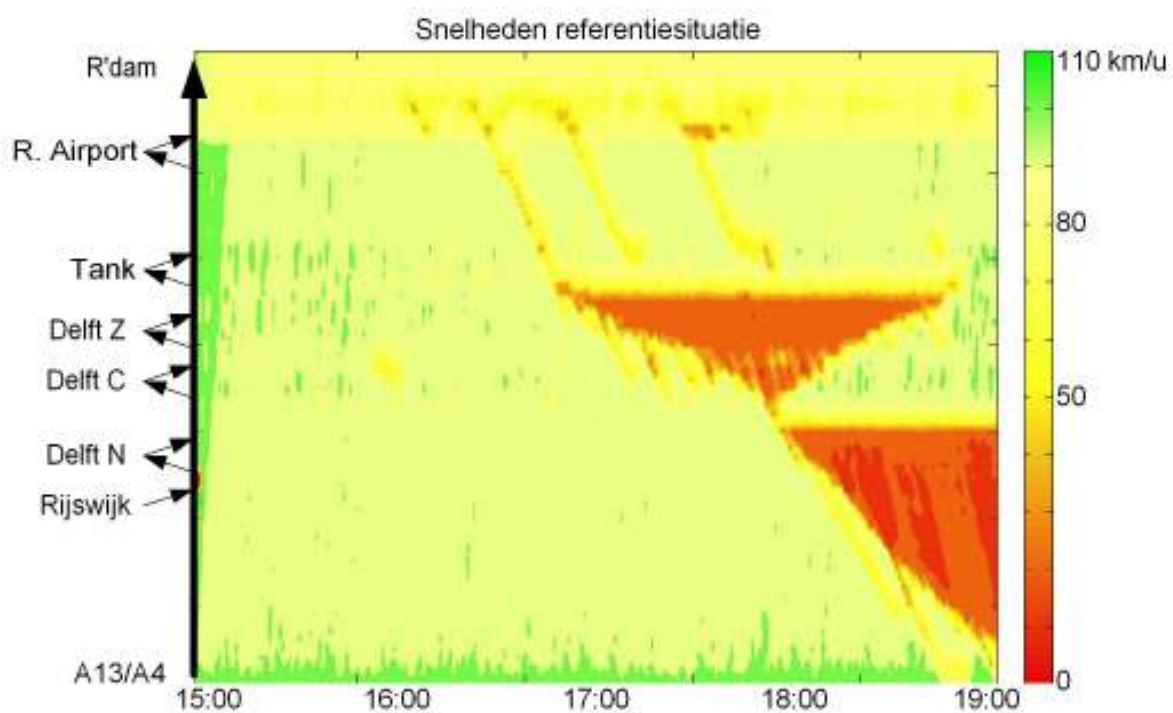




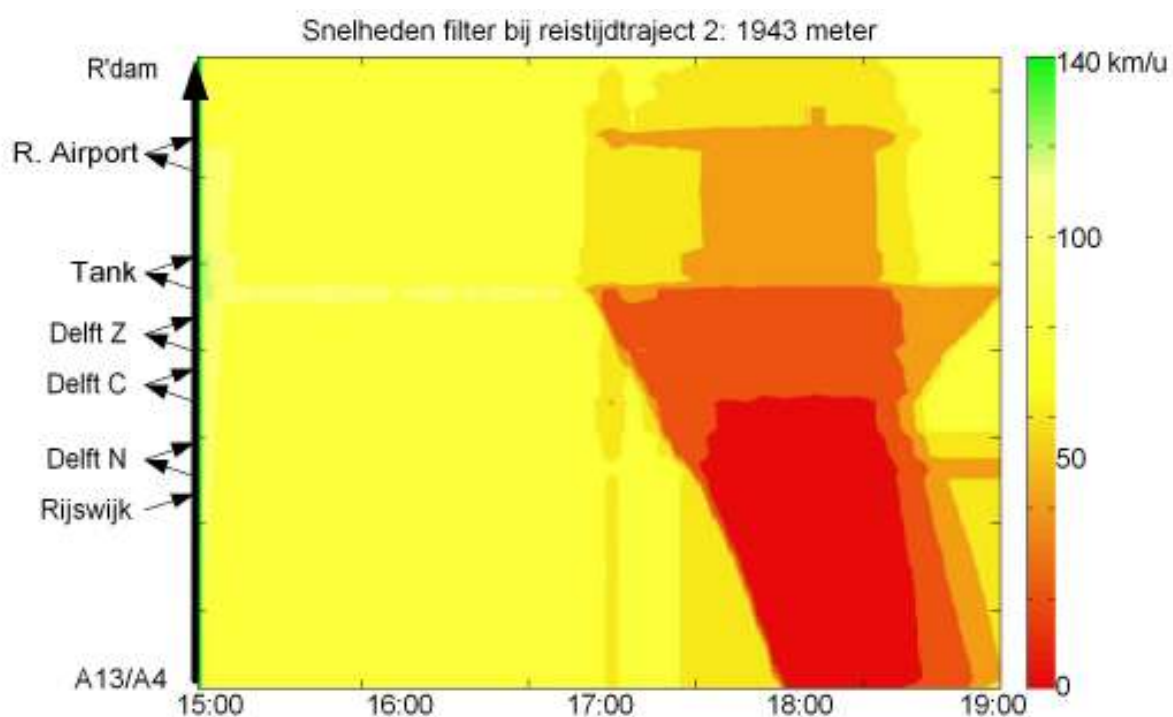
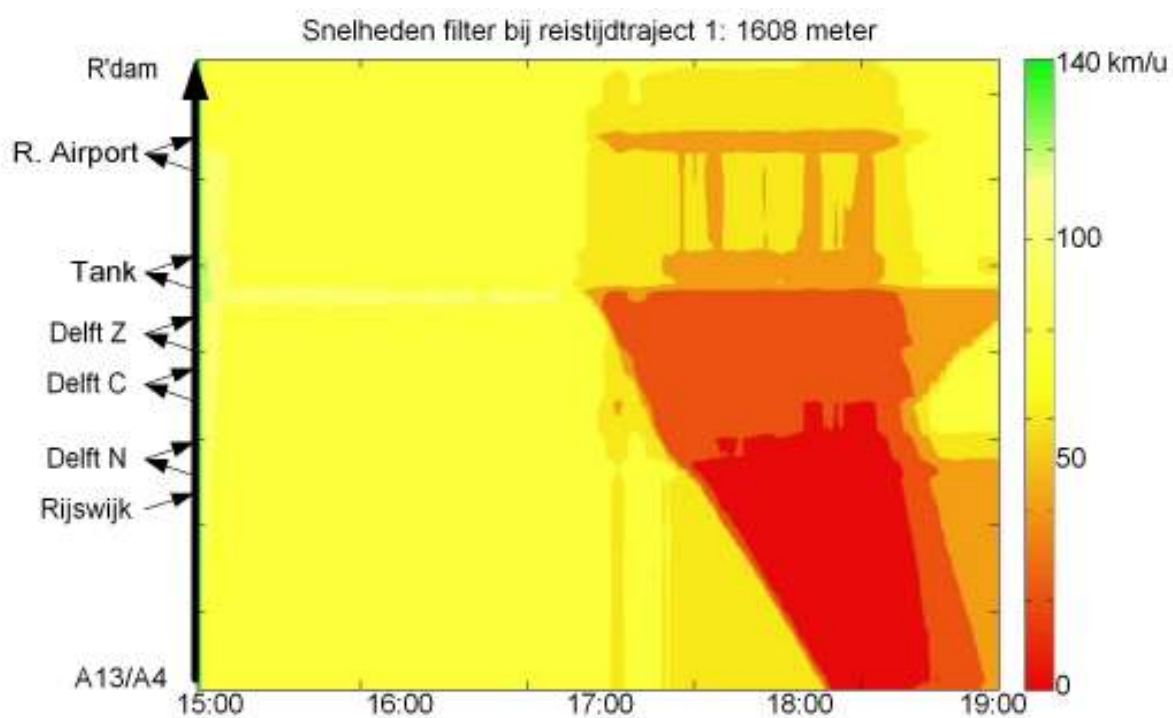
5 Details testnetwerk

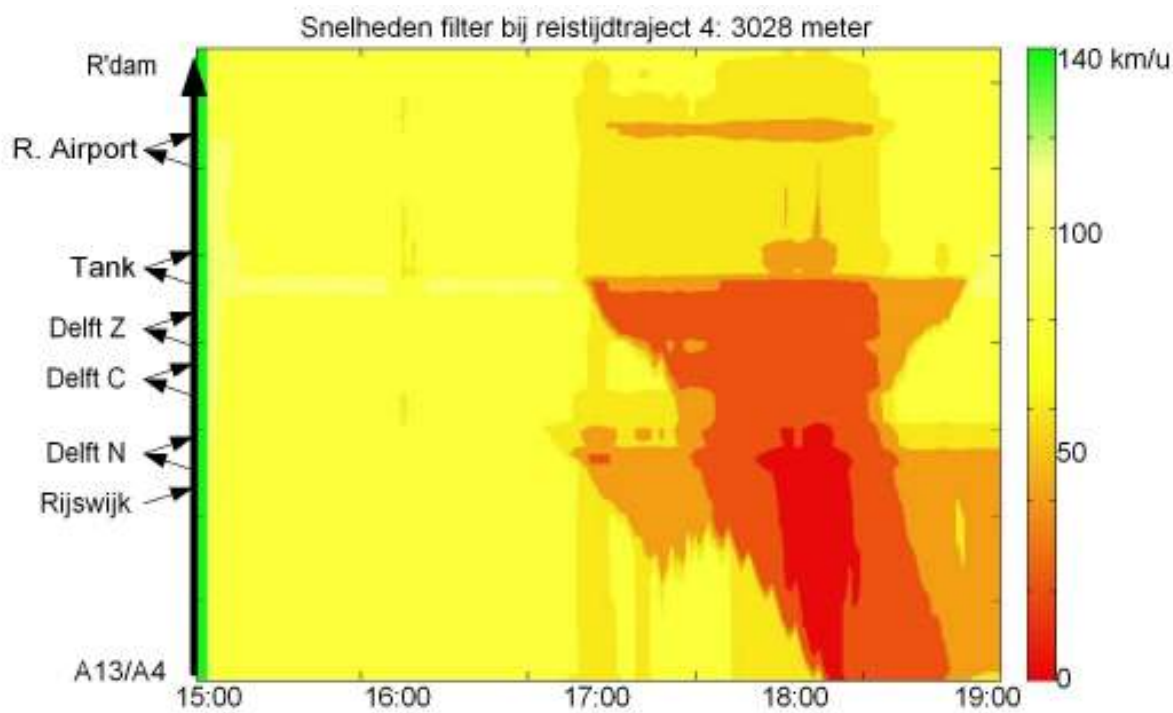
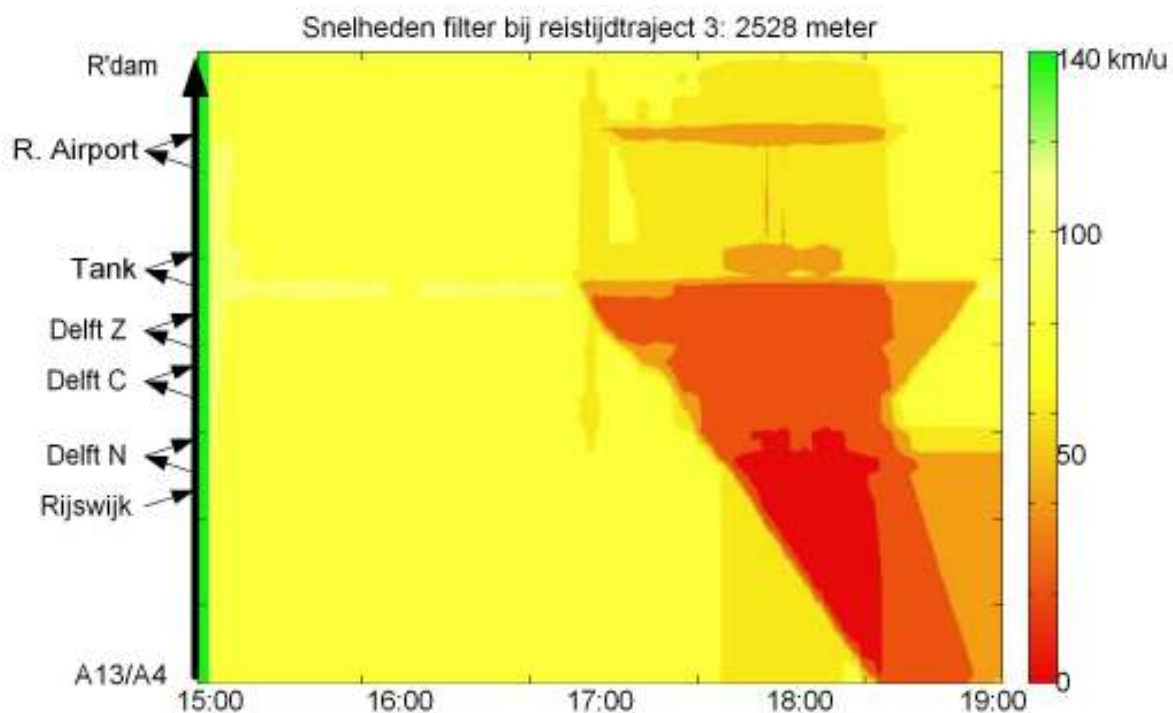


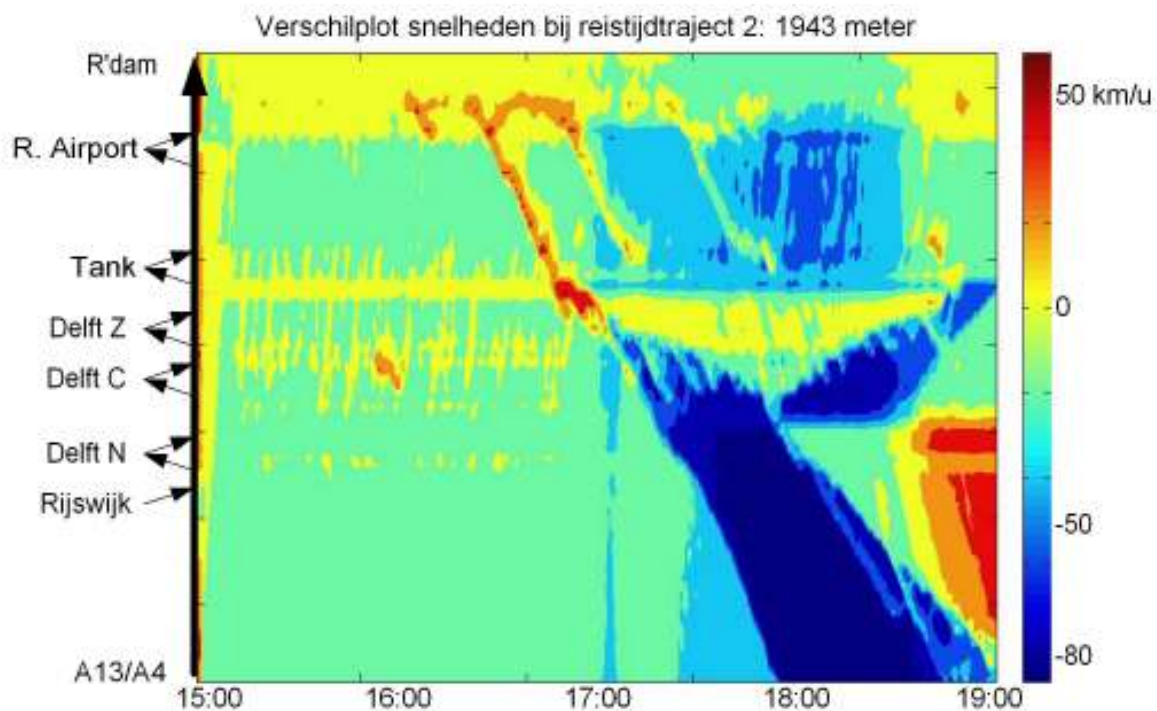
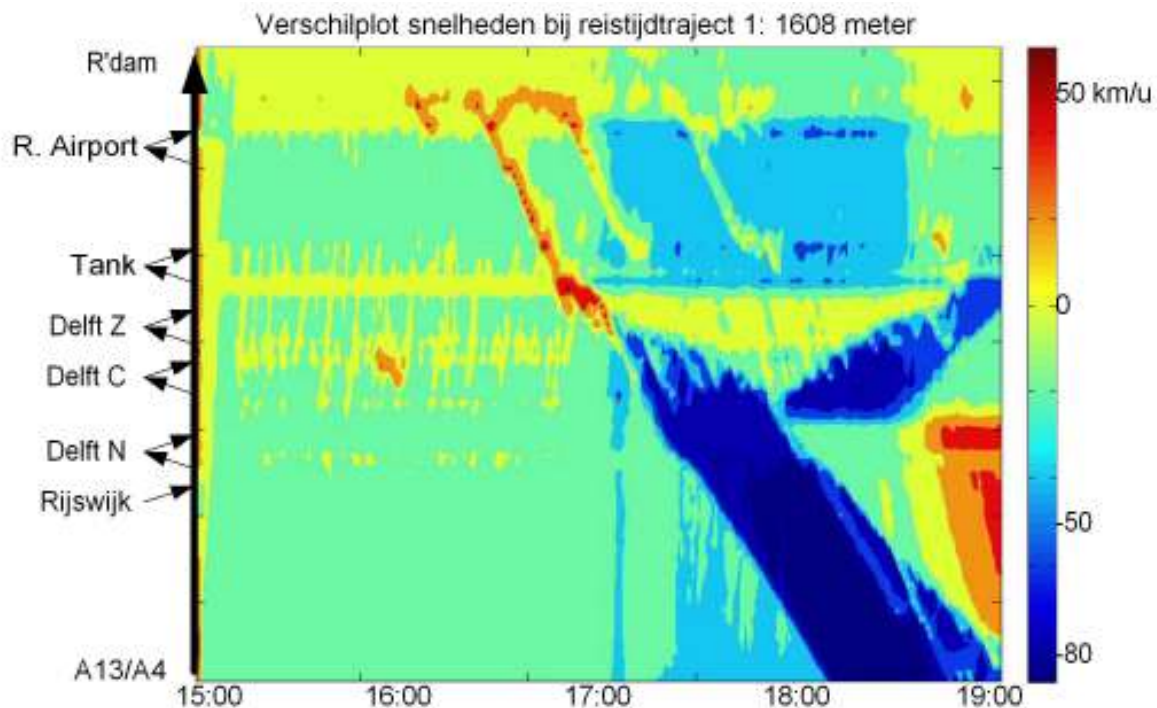
6 Resultaten in beeld: huidige situatie

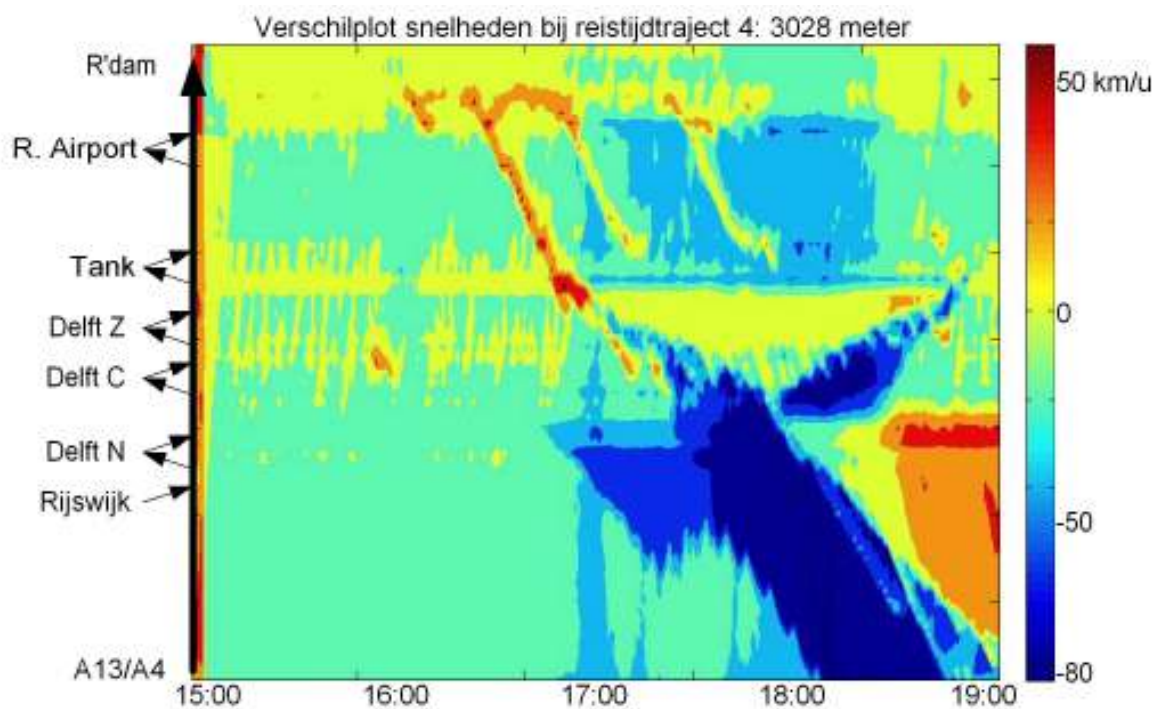
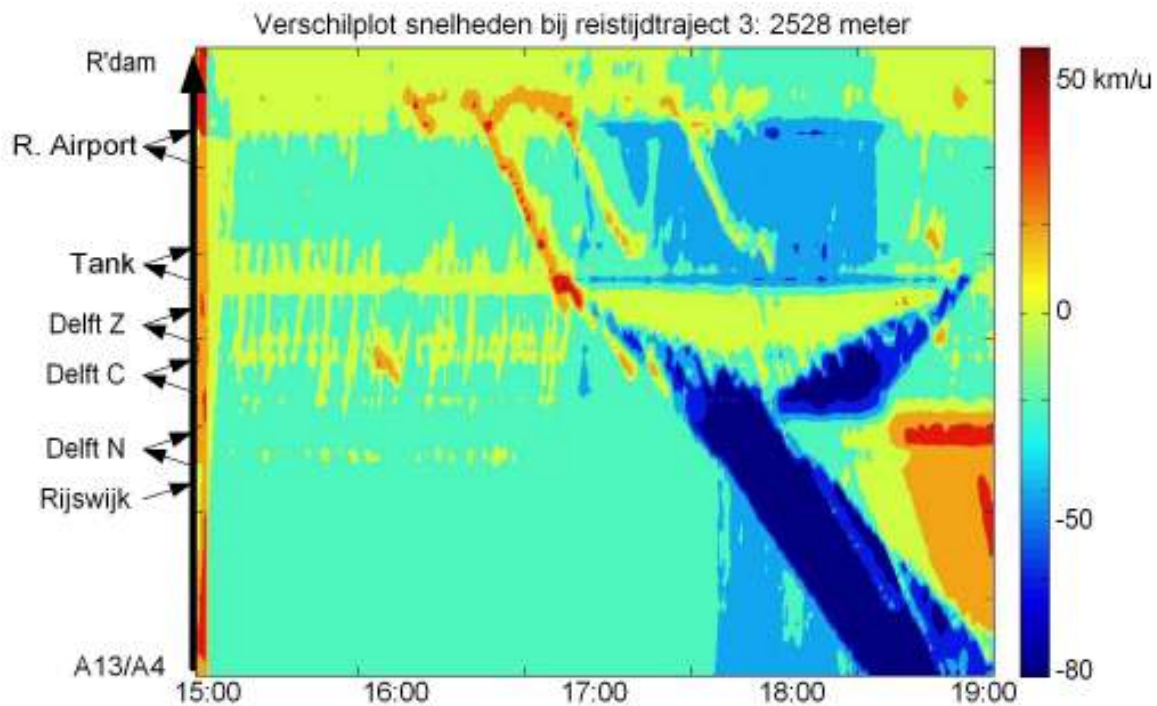


7 Resultaten in beeld: toegevoegde waarde









8 Resultaten in beeld: vervangende waarde

Testspecificaties			RMSE (km/u)			
Nr	Traject	Kosten (k€/km)	Totaal	VA	OC	AC
H1	-	102	17	9	18	26
A1	1608	187	28	9	34	42
S1-1	1608	124	29	9	34	43
S1-2	1608	93	28	9	34	42
A2	1943	180	30	9	36	44
S2-1	1943	129	29	9	35	44
S2-2	1943	103	28	9	33	43
S2-3	1943	77	30	9	36	45
A3	2528	158	24	11	26	37
S3-1	2528	99	26	11	31	39
S3-2	2528	79	24	11	26	37
S3-3	2528	59	29	13	36	40
A4	3028	148	27	12	32	38
S4-1	3028	99	25	11	30	36
S4-2	3028	83	24	12	26	34
S4-3	3028	66	27	11	33	39

Testspecificaties			β				α (km/u)			
Nr	Traject	Kosten (k€/km)	Totaal	VA	OC	AC	Totaal	VA	OC	AC
H1	-	102	0,55	0,18	0,61	0,40	32	74	22	35
A1	1608	187	0,57	-0,01	0,48	0,24	25	94	20	31
S1-1	1608	124	0,56	-0,01	0,47	0,22	25	94	20	32
S1-2	1608	93	0,56	-0,01	0,47	0,24	25	94	20	31
A2	1943	180	0,53	0,00	0,43	0,18	28	93	22	35
S2-1	1943	129	0,54	0,00	0,45	0,19	27	93	21	35
S2-2	1943	103	0,54	0,00	0,49	0,20	27	94	19	34
S2-3	1943	77	0,52	-0,01	0,43	0,16	29	94	22	37
A3	2528	158	0,57	0,04	0,58	0,31	29	90	19	34
S3-1	2528	99	0,53	0,00	0,44	0,27	31	93	25	35
S3-2	2528	79	0,56	0,04	0,58	0,29	29	90	19	35
S3-3	2528	59	0,47	-0,03	0,31	0,22	34	95	31	38
A4	3028	148	0,47	0,01	0,37	0,22	35	92	31	40
S4-1	3028	99	0,51	0,02	0,40	0,28	33	92	29	36
S4-2	3028	83	0,52	0,01	0,49	0,30	33	92	25	37
S4-3	3028	66	0,45	0,02	0,30	0,19	37	92	34	43

Testspecificaties			RMSE (km/u)			
Nr	Traject	Kosten (k€/km)	Totaal	VA	OC	AC
H1.2	-	102	16	12	24	-
A1.2	1608	187	35	22	55	-
S1-1.2	1608	124	36	22	56	-
S1-2.2	1608	93	35	22	55	-
A2.2	1943	180	38	24	60	-
S2-1.2	1943	129	37	23	59	-
S2-2.2	1943	103	36	22	57	-
S2-3.2	1943	77	38	24	60	-
A3.2	2528	158	30	17	47	-
S3-1.2	2528	99	34	22	52	-
S3-2.2	2528	79	30	17	48	-
S3-3.2	2528	59	38	27	55	-
A4.2	3028	148	35	24	52	-
S4-1.2	3028	99	33	22	49	-
S4-2.2	3028	83	30	20	44	-
S4-3.2	3028	66	35	24	53	-

Testspecificaties			β				α (km/u)			
Nr	Traject	Kosten (k€/km)	Totaal	VA	OC	AC	Totaal	VA	OC	AC
H1.2	-	102	0,53	-0,03	0,46	-	35	92	35	-
A1.2	1608	187	0,52	-0,21	0,02	-	24	106	34	-
S1-1.2	1608	124	0,51	-0,22	0,00	-	25	107	35	-
S1-2.2	1608	93	0,51	-0,22	0,01	-	25	107	35	-
A2.2	1943	180	0,45	-0,23	-0,12	-	29	107	41	-
S2-1.2	1943	129	0,46	-0,23	-0,10	-	29	108	41	-
S2-2.2	1943	103	0,46	-0,23	-0,06	-	29	108	40	-
S2-3.2	1943	77	0,43	-0,23	-0,14	-	31	107	43	-
A3.2	2528	158	0,49	-0,24	0,11	-	32	113	39	-
S3-1.2	2528	99	0,44	-0,23	-0,01	-	33	107	42	-
S3-2.2	2528	79	0,48	-0,24	0,08	-	33	112	40	-
S3-3.2	2528	59	0,35	-0,27	-0,13	-	37	107	47	-
A4.2	3028	148	0,35	-0,25	-0,08	-	39	108	48	-
S4-1.2	3028	99	0,41	-0,28	-0,01	-	35	112	44	-
S4-2.2	3028	83	0,42	-0,25	0,09	-	37	110	43	-
S4-3.2	3028	66	0,32	-0,30	-0,15	-	42	113	52	-

