Opstellen meetsysteem dataverzameling congestie

Ben Gorte, Henk van Zuylen, Serge Hoogendoorn

Augustus 2002

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-generaal Rijkswaterstaat
Adviesdienst Verkeer en Vervoer

Delft
:he Universiteit Delft
versity of Technology

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Verkeerskunde

Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Transportation and Traffic Engineering Section

Rapp
CT
VK
202-06

Transportation and Traffic Engineering Section

Delft University of Technology
Stevinweg 1
P.O. Box 5048
2600 GA Delft
The Netherlands

Telephone	:	+31 (0) 15 278 16 81
Telefax	:	+31 (0) 15 278 31 79
E-mail	:	N.Fontein@ct.tudelft.nl
Internet	:	http://www.transport.citg.tudelft.nl

VK 2002.006
ISSN: 0920-0592

701415

Opstellen meetsysteem dataverzameling congestie

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft

Sectie Verkeerskunde
en
Sectie Fotogrammetrie en Remote Sensing

In opdracht van

Adviesdienst Verkeer en Vervoer
Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Rapp
CT
Vk
202_06

Technische Universiteit Delft
Faculteit CiTG
Bibliotheek Civiele Techniek
Stevinweg 1
2628 CN Delft

3137 138

Project:	Opstellen meetsysteem dataverzameling congestie
Start project:	april 2002
Einde project:	juli 2002
Opdrachtgever:	Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer Ir. Marco Schreuder
Projectuitvoering:	Technische Universiteit Delft Sectie Verkeerskunde Dr. Ir. Serge P. Hoogendoorn (projectleiding TUD) Prof. Dr. Henk J. Van Zuylen Technische Universiteit Delft Sectie Fotogrammetrie en Remote Sensing Dr. Ben Gorte Prof. Dr. George Vosselman
Auteur(s) rapport:	Ben Gorte, Henk van Zuylen, Serge Hoogendoorn

De software mag alleen voor toepassingen in het kader van dit project worden gebruikt. De software mag niet zonder toestemming van de Sectie Fotogrammetrie en Remote Sensing worden verspreid.

Samenvatting

Opstellen meetsysteem dataverzameling congestie

De wijze waarop deze gegevens waargenomen worden is het hoofdonderwerp van deze studie. Er is gekozen om fotowaarnemingen uit te voeren vanaf een hoogte van ca. 500 m met een digitale camera met een frequentie van 8.6 beelden per seconde. Deze beelden worden opgeslagen op een computer en achteraf geanalyseerd, met speciale software die ten behoeve van dit project is ontwikkeld.

Het resultaat van de werkzaamheden is vierledig:
1. Software om digitale beelden van verkeer te bestuderen en te selecteren voor verdere verwerking
2. Prototypes van software voor het automatisch afleiden van trajectoriën uit beeldreeksen.
3. Een verzameling beelden en daaruit afgeleide voertuigtrajectorieën, die wellicht niet aan alle eisen van het voertuigvolgsysteem voldoen, maar waarmee de modelleringmethodiek ontworpen en getoetst kan worden
4. Een analyse met betrekking tot de gevolgde inwinnings- en verwerkingsmethodiek, ten behoeve van de ontwikkeling van een definitief systeem.

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat de ontwikkeling van een dergelijk datainwinsysteem mogelijk is. De toegepaste meetopstelling en ontwikkelde methodes bieden goede perspectieven voor de dataverzameling ten behoeve van het onderzoek "Verkeersafwikkeling in Congestie", maar ook voor toepassing voor bijvoorbeeld evaluatiestudies. Uit het onderzoek is echter wel gebleken dat weersomstandigheden de kwaliteit van de gegevens nadelig kunnen beïnvloeden (mist, heiigheid) en dat de toepassing van het systeem niet in alle situaties mogelijk zal zijn.

De belangrijkste conclusies die uit het onderzoek volgen zijn de volgende:
- De fototechnische bewerkingen die nodig zijn om uit de digitale opnames te komen (m.n. opheffen beeldvertekening, ontschranken, georeferencing, correctie lichtomstandigheden, detectie en tracking) tot voertuigtrajectoriën zijn zonder grote problemen automatisch softwarematig uitgevoerd.
- De gebruikte camera met framegrabber bleek niet optimaal voor het gestelde doel. De opnamesnelheid en de mogelijkheden om meerdere beeldreeksen te bewaren voldeden niet aan de gestelde eisen. De gestelde eisen van 50 cm nauwkeurigheid van plaatsbepaling kan weliswaar gehaald worden: de nauwkeurigheid van de detectie in de twee geanalyseerde beeldsequenties (vanaf 500 m en vanaf 300 m hoogte) bedroeg respectievelijk 22 cm en 13 cm. De vereiste opname frequentie van 10 Hz blijkt met de gebruikte apparatuur niet haalbaar; 8.6 Hz bleek wel mogelijk.
- Bij de gebruikte meetopstelling is het mogelijk gebleken een onderzoekstraject met een lengte van (slechts) 210 m te gebruiken, i.p.v. de beoogde 500 m. Voor de tweede geanalyseerde beeldreeks (vanaf 300 m hoogte) bedroeg het waargenomen wegvak slechts 120 m. De oorzaak hiervan is tweeledig: enerzijds bleek een chip geleverd met een te klein lichtgevoelig oppervlak voor de gebruikte lens, waardoor de opnames slechts 280 m besloegen. Dit probleem kan vanzelfsprekend in de toekomst eenvoudig worden vermeden. Anderzijds is het te wijten aan de stabiliteit van de helikopter. Om in een vervolgstudie onnodig beeldverlies te voorkomen en het mogelijk te maken langere beeldsequenties in te winnen is het gebruik van gyroscopische camera stabilisatie wenselijk.
- Er is geen limiet gevonden voor het aantal waar te nemen voertuigen, afgezien van de fysieke limiet van de maximale voertuigdichtheid.
- De lengtes van de geanalyseerde beeldsequenties waren respectievelijk 35 s en 52 s. Op dit moment kan nog geen uitsluitsel worden gegeven over de maximale duur van de opnames, met name door het ontbreken van gyroscopische stabilisatie en een

tweede camera die door de piloot gebruikt kan worden om het waargenomen wegvak te kunnen volgen.

- Het percentage gedetecteerde / getrackte voertuigen in de eerste sequentie (licht congestieve afwikkeling) ligt rond de 98%; het aantal gedetecteerde / getrackte voertuigen in de tweede sequentie (zware congestie) ligt rond de 93%. De oorzaak van de minder goede resultaten in de tweede sequentie is met name gelegen in de slechtere omstandigheden en is niet te wijten aan de verkeerskarakteristieken.
- Ook de slechte beheersbaarheid van de installatie tijdens de opnames maken het noodzakelijk dat er aanpassingen worden aangebracht aan het waarnemings- en registratiesysteem.

Voor de verdere ontwikkeling van het meetsysteem verdient het derhalve aanbeveling om een tweede helikoptervlucht uit te voeren onder gunstigere condities (betere weerscondities, andere lichtgevoelige chip, gyroscopische mounting camera, gebruik GPS). Ook behoeft de tracking software (finematching) extra aandacht en dient in de software de detectie en de tracking geïntegreerd te worden.

Het valideren van het ontwikkelde meetsysteem kan op een aantal manieren gebeuren, bijvoorbeeld door het gebruik van reeds bestaande inductielussen (MONICA / MARE data; geaggregeerde data op een doorsnede), of RESI / pneumatische slangen (individuele voertuigdata op doorsnede). Het gebruik van een geinstrumenteerd voertuig die precieze informatie levert over zijn positie, snelheid en de posities en de snelheden van de omliggende voertuigen behoort ook tot de mogelijkheden en verdient de voorkeur.

Ten behoeve van het onderzoek rijgedrag in congestie zal het noodzakelijk zijn één of meerdere vluchten te plannen, onder gunstige weersomstandigheden. Gedurende deze vluchten worden voor verschillende situaties gegevens verzameld. Situaties worden gekenmerkt door het type discontinuïteit (weefvak, toerit, afrit, geen discontinuïteit), de geometrie van de discontinuïteit (lengte in- en uitvoegstrook), de verkeersvraag (vraag op toerit, op afrit, etc.), samenstelling van het verkeer, etc. Ook wordt op verschillende locaties in de file gemeten (de kop, de staart, en in de file).

Het vervolgonderzoek in zake de waarnemingsmethode zal zich met name moeten richten op:

- De (verkeerskundige) analyse van een langere beeldreeks (> 5 min) voor een wegvak van 500 m.
- Onderzoek naar het gebruik van een kleurenbeeldmateriaal en de effecten op nauwkeurigheid van de detectie en tracking.
- Het volgen van voertuigen over langere wegvakken (> 500 m). Mogelijkheden hiertoe bestaan uit het combineren van beelden van verschillende camera's vanuit dezelfde dan wel vanuit verschillende helikopters;
- het meevliegen met de verkeersstroom en de hiervoor benodigde softwarematige aanpassingen.
- Het integreren van verschillende informatiebronnen (bijvoorbeed infrarood). Hiermee kunnen voertuigen wiens kenmerken slechts weinig afwijken van het wegdek worden gevolgd.

Delft, 12 augustus 2002.

English summary

In gaining more insight into the different processes that play a role in the occurrence and resolution of congestion, improved theories and models to describe and predict driving behaviour during congestion are to be developed. To this end, very detailed information is needed regarding the driver's behaviour in busy traffic. To realise this, in the course of this project a vehicle-detection and tracking system has been developed to determine time-space diagrams.

The way in which these data are collected is the main subject of this study. It was decided to collect photographic image sequences from an observation point of 500 m height using a digital camera at a frequency of 8.6 Hz. These image sequences are stored on a digital computer to be processed afterwards with special software that has been developed especially for this project.

The results of the project are fourfold:
1. Software to study the digital photographic images of traffic and to select the sequences for further selection;
2. Software prototypes to automatically determined vehicle trajectories from selected image sequences
3. A collection of image sequences and the vehicle trajectories that have been automatically determined from these. The trajectories may or may not satisfy all the demands that are required for scientific analysis, but will at least aid the techniques and methods to determine and test the theories and models to be developed.
4. Analysis of the used data collection and processing method, providing guidelines for future system developments.

In general it can be concluded that the proposed approach to data collection and processing is feasible, not only from the viewpoint of the aforementioned research project, but also from the perspective of ex-post evaluation studies. It is to be noted that weather conditions have a significant effect on the reliability and accuracy of the method, restricting the applicability of the approach.

The main conclusions that can be drawn are:
1. The photogrammetric procedures that are required to determine the vehicle trajectories for the image sequences (correction for lens distortion, orthorectification, georeferencing, radiometric correction, detection, tracking) have been applied without much difficulty.
2. The used camera and frame grabber did not quite satisfy the requirements since the recording frequency was slightly too small. Furthermore, the used system provides no possibilities to store multiple image sequences (all footage was to be collected in one run). The required 50 cm accuracy for the determination of vehicle positions was attained: the accuracy of the two sequences that were analysed (from 500 m and 300 m height respectively) equals 22 cm and 13 cm. The required frequency of 10 Hz appeared to be unattainable; 8.6 Hz was possible.
3. Using the measurement set-up, it was possible to consider a study region of only 210 m (first image sequence) or 120 m (second image sequence), instead of the required 500 m. The reasons for this where two-fold. For one, the light-sensitive area of the chip in the camera appeared too small for the used camera. Secondly, the instability of the helicopter decreased the length of the area as well. The latter problem can be avoided (to a certain extent) using a gyroscopic mounting.
4. There is no limit to the number of vehicles that can be detected and tracked.
5. The lengths of the processed image sequences were respectively 35 s and 52 s due to the instability of the helicopter. At this time, the question regarding the maximum length of the image sequences cannot be answered at this time. It is argued that using a second camera allowing the helicopter pilot to better aim the main camera, as well as the gyroscopic mounting

6. The percentage of vehicles that could be detected and tracked in the first sequence (light congestion) is approximately 98%; in the second sequence (heavy congestion) this number decreased to 93%. The reason for the poorer results in the second sequence is *not a result of the traffic conditions*, but rather of the worsened ambient and weather conditions.
7. The poor controllability of the data collection system during image collection will require making adjustments to the image collection and storage system.

For future system developments it is recommended that a second helicopter flight under more favourable circumstances (better weather conditions, different light-sensitive chip, GPS, gyroscopic mounting of the camera, second camera) be performed. There is also a need to integrate the detection and tracking software and to improve the tracking software (i.e. considering so-called fine matching).

The validation of the developed measurement system can be performed in a number of ways, for instance by using measurement systems that are already in place (MONICA / MARE) or available (RESI, pneumatic tubes). A preferred alternative is the use of an instrumented probe vehicle that allows for accuracy position and speed measurements of the probe itself and of the vehicles in the direct surroundings of the probe.

In favour of the research on driving behaviour during congestion it will be required to plan one or more new flights under favourable circumstances. During these flights data will be collected for different traffic situations (type of discontinuity, its geometry, traffic demands, traffic composition, etc.). The queues need also to be observed at different locations (inside the queue, at its tail, and its head).

Future research will hence be focussed on the following issues:
1. The analysis (from a traffic engineering viewpoint) of a longer image sequence (e.g. more than 5 minutes) of a 500 m roadway section.
2. Study the improvement in detection and tracking reliability and accuracy using colour images instead of black and white footage.
3. Tracking of the vehicles over longer roadway stretches (> 500 m), for instance by combining footage from different cameras (either from the same or from different helicopter) or by flying along with the traffic flow.
4. Integration of different sources of information, such as photographic images and infrared images. This will improve the ability to detect vehicles which features cannot be easily distinguished from the roadway surface.

Delft, 12 augustus 2002.

Inhoudsopgave

1 INLEIDING 9

2 PROBLEEMANALYSE 11

2.1 Onderzoeksvragen rijgedrag bij congestie 11

2.2 Doelstelling onderzoek meetsysteem 11

2.3 Eisen meetsysteem 12

3 METHODIEK, MEETMETHODEN EN APPARATUUR 15

3.1 Camerasysteem 15

3.2 Computersysteem 16

3.3 Software 16

3.4 Helikopter en gyroscopische mounting 17

4 METHODIEK VAN DE GEGEVENSANALYSE 19

4.1 Selectie beeldreeks 19

4.2 Correctie voor lensvertekening 19

4.3 Ontschranking 20

4.4 Radiometrische correctie 23

4.5 Selectie subset 23

4.6 Berekenen achtergrondbeeld 23

4.7 Voertuigdetectie 24

4.7.1 Het gebruikte detectie-algoritme 25

4.8 Voertuig-tracking 27

4.9 Coordinaat-conversie voertuigposities en –afmetingen 29

5 RESULTATEN VAN DE TESTSITUATIE 31

5.1 Analyseresultaten eerste deelreeks 31

5.2 Analyseresultaten tweede deelreeks 31

5.3 Beknopte verkeerskundige analyse 33

5.4 Aanbevelingen naar aanleiding van de testsituaties 38

6 CONCLUSIES 41

6.1 Conclusies met betrekking tot onderzoeksvragen 41

6.2 Leerpunten 42

7 ONDERZOEKSOPZET VERVOLGTRAJECT 43

7.1 Tweede fase ontwikkeling nieuw meetsysteem 43

7.1.1 Tweede helikoptervlucht 43

7.1.2 Verdere ontwikkeling software 44

7.1.3 Gebruik kleurbeeldmateriaal; integratie beeldreeksen verschillende camera's; integratie databronnen 44

7.1.4 Post-processing data 45

7.1.5 Uitgebreide data analyse en validatie meetsysteem 45

7.2 Onderzoek rijgedrag bij congestie 46

8 LITERATUUR 49

BIJLAGEN 51

A BESCHRIJVING CODE 53

B DATAFORMAAT 55

C VERSLAG VLUCHT 57
C.1 Omstandigheden tijdens de vlucht 57
C.2 Chronologisch overzicht meting 58

D OVERZICHT VOORONDERZOEK 61
D.1 Toepasbaarheid van digitale camera's 62
D.2 Toepasbaarheid videocamera's 64
D.3 Luchtfotografie 64
D.4 Foto's vanaf een hoog gebouw 65
D.5 Proefopnames pilot 66
D.6 Conclusies 68

1 Inleiding

Verkeerscongestie op snelwegen is een belangrijk maatschappelijk vraagstuk. Verdere uitbreiding van het snelwegennet is zeer kostbaar en is ook om andere redenen niet altijd gewenst. Daarom wordt gezocht naar vergroting van de kennis over de *oorzaken* van verkeerscongestie, met name naar de invloed van het gedrag van de individuele bestuurder op het ontstaan van files. Een beter begrip hiervan kan leiden tot maatregelen om congestie te voorkomen, of de nadelige gevolgen te beperken.

Om meer inzicht te krijgen in de processen die een rol spelen bij het ontstaan van congestie, wordt gestreefd naar het ontwikkelen van modellen voor verkeersstromen. Om zulke modellen te kunnen opstellen, kalibreren en valideren is informatie nodig met betrekking tot het gedrag van bestuurders van gemotoriseerde voertuigen in druk verkeer. Om dit te realiseren wordt een voertuigvolgsysteem ontwikkeld voor het inwinnen van een grote verzameling zogeheten *voertuigtrajectoriën,* tijd-weg diagrammen waarmee men het gedrag van bestuurders op statistisch verantwoorde wijze kan modelleren. Dit wordt een omvangrijk systeem, gezien de eisen die gesteld worden aan

- de lengte van het te onderzoeken traject
- het aantal waar te nemen voertuigen
- de duur van de opnamen
- de nauwkeurigheid van de bepaling van positie en snelheid van ieder voertuig
- de temporele resolutie van deze positie- en snelheidsbepalingen

De wijze waarop deze gegevens waargenomen worden is het hoofdonderwerp van deze studie. Er is gekozen om fotowaarnemingen uit te voeren vanaf een hoogte van ca. 500 m met een digitale camera met een frequentie van 10 beelden per seconde. Deze beelden worden opgeslagen op een computer en achteraf geanalyseerd.

Het resultaat van de werkzaamheden is vierledig:

1. Software om digitale beelden van verkeer te bestuderen en te selecteren voor verdere verwerking
2. Prototypes van software voor het automatisch afleiden van trajectoriën uit beeldreeksen.
3. Een verzameling beelden en daaruit afgeleide voertuigtrajectoriën, die wellicht niet aan alle eisen van het voertuigvolgsysteem voldoen, maar waarmee de modelleringsmethodiek ontworpen en getoetst kan worden
4. Een analyse met betrekking tot de gevolgde inwinnings- en verwerkingsmethodiek, ten behoeve van de ontwikkeling van een definitief systeem.

In dit rapport wordt allereerst het probleem geanalyseerd en herleid tot een taakstelling voor het experiment. Hoofdstuk 3 beschrijft welke technische oplossingen gekozen zijn. Het volgende hoofdstuk beschrijft de analyse van de meetdata, waarbij het probleem van de ontschranking, het passen van de beelden op vaste herkenningspunten op de grond, helderheidscorrecties en de automatische voertuigdetectie ter sprake komen. Hoofdstuk 5 geeft de resultaten van de metingen en analyse. Het volgende hoofdstuk staat stil bij de oorspronkelijke probleemstelling en laat zien in hoeverre dit onderzoek de gestelde doelen heeft kunnen bereiken. Hoofdstuk 7 bevat een voorstel voor een verder vervolg.

In de bijlagen worden de ontwikkelde code en dataformat gespecificeerd, almede de algoritmen voor beeldverwerking. Het verslag van de meetdag is in bijlage C te vinden en de laatste bijlage D bevat een beschrijving van het vooronderzoek.

2 Probleemanalyse

De kennis over het gedrag van autobestuurders in congestie is vrij beperkt. In het verleden zijn er metingen gedaan aan enkele voertuigen en in rijsimulatoren en worden conventionele monitoringsystemen gebruikt om de karakteristieken van wegverkeer te analyseren. Lusdetectoren, radar, videocamera's e.d. kunnen worden toegepast om voertuigen over enige afstand te volgen. Er zijn mogelijkheden om met een combinatie van GPS en GSM voertuigen over langere afstand te volgen ook over wegen waar geen andere detectoren liggen. Kentekens die automatisch herkend worden uit video-opnames bieden ook mogelijkheden om voertuigen over langere afstand te volgen.

Veel van de modellen die gebruikt worden om microscopisch verkeersgedrag te beschrijven bevatten veronderstellingen over het gedrag van een bestuurder die maar ten dele berusten op waarnemingen in de praktijk. De kalibratie van de modellen vindt vaak indirect plaats: microscopische parameters worden zodanig gekozen, dat macroscopisch gedrag consistent is met waargenomen macroscopische verkeerskarakteristieken. Zelfs deze macroscopische data zijn slechts beperkt beschikbaar: Duitse onderzoekers als Dirk Helbing gebruiken al jaren de gegevens die door het Nederlandse MONICA systeem verzameld zijn om hun modellen mee te kalibreren. Het bestaan van stabiele of metastabiele verkeersstromen in congestieve omstandigheden wordt berekend met macroscopische modellen, maar de data om deze modellen te kalibreren zijn verzameld voor omstandigheden die anders zijn dan die waarvoor de modellen toegepast worden. De informatie betreffende volggedrag en trajectorieën van voertuigen kan met microscopische modellen berekend worden, maar empirisch waargenomen voertuigtrajectorieën zijn beperkt beschikbaar en de beschikbare meetgegeven worden keer op keer gebruikt (Treiterer and Myers,1974).

2.1 Onderzoeksvragen rijgedrag bij congestie

Dit betekent dat er een gebrek is aan meetsystemen om het gedrag van bestuurders in congestie te kunnen bestuderen. Wanneer zo'n systeem beschikbaar was, zouden de volgende vragen beantwoord kunnen worden:

- Wat is het gemiddelde volggedrag van bestuurders in congestie en bij het ontstaan van congestie. Zijn de modellen die in de jaren '70 zijn ontwikkeld nog steeds geldig of zijn er betere modellen en meer valide modelparameters te geven?
- Is het hiaat dat bestuurders accepteren om in te voegen van een toerit anders dan de volgafstand die zij aanhouden wanneer ze eenmaal ingevoegd hebben?
- Hoe is het inhaalgedrag op smalle rijstroken. Hoe hangt dat af van obstakels langs de weg en de breedte van voertuigen op de andere stroken?
- Bestaan er meerdere stabiele verkeersstroomcondities wanneer de toestand dicht tegen congestie aanzit dan wel in congestie bevindt?
- Is het mogelijk dat een enkele microscopische gebeurtenis een significante invloed heeft op de macroscopische toestand van de verkeersstroom (dat zou te interpreteren zijn als het bestaan van macroscopisch onverklaarbare toestandsovergangen)?
- Hoe wikkelt het verkeer zich af in geval van wegwerkzaamheden?
- Hoe gedragen weggebruikers zich tijdens het weven?

Deze lijst met belangrijke vragen is nog veel langer te maken. Het antwoord op die vragen zal leiden tot een sterkere, gevalideerde verkeersstroomtheorie en tot mogelijkheden om het effect van verschillende geometrische omstandigheden op de wegcapaciteit te voorspellen.

2.2 Doelstelling onderzoek meetsysteem

Het antwoord op bovengenoemde vragen vereist echter een nieuwe manier van verkeerswaarneming, die het mogelijk maakt de dynamica van individuele voertuigen en hun onderlinge samenhang te bestuderen. Dit doelstelling van dit project is derhalve de ontwikkeling van een waarnemingsmethode voor het verzamelen van individuele

voertuigtrajectoriën en andere individuele voertuigkarakteristieken zoals voertuiglengte, met name tijdens congestieve verkeersafwikkeling. Hierbij is een belangrijke randvoorwaarde dat alle voertuigen kunnen worden gedetecteerd.

2.3 Eisen meetsysteem

Aan het definitieve voertuigvolgsysteem worden eisen gesteld qua ruimtelijke en temporele resolutie. Met de gewenste nauwkeurigheid van de trajectoriën lijkt de ruimtelijke resolutie de voornaamste bottleneck te vormen. Er wordt een ruimtelijke nauwkeurigheid van 0,5 m of beter nagestreefd, een nauwkeurigheid van relatieve snelheden van 0,5 m/s. Op grond van algemene aanvaarde veronderstellingen aangaande het rijgedrag is in dit onderzoek uitgegaan van een gewenste ruimtelijke nauwkeurigheid van 0,4 m (zie bijlage D).

Voor de opnamefrequentie spelen twee zaken een rol:

1. De tijdsnauwkeurigheid waarmee waarnemingen gedaan worden. Op grond vn de gemiddelde reactietijd van 0,5 s van de bestuurders is hiervoor een frequentie van 2 Hz voldoende (zie bijlage D).
2. De mogelijkheid om automatisch voertuigen van beeld tot beeld te volgen. Daar voertuigen wel 3 m per seconde afleggen, is het raadzaam de tijd tussen twee opnames niet groter te maken dan 0,1 s, zodat de afstand die tussen beide beelden wordt afgelegd klein blijft ten opzichte van de volgafstand tussen twee auto's.

Bepalend voor de nauwkeurigheid waarmee voertuigtrajectoriën gemeten kunnen worden zijn de resolutie van de beelden, de positie van de camera ten opzichte van de weg, de tijdsregistratie en de opnamefrequentie. In een vooronderzoek, zoals beschreven in bijlage D, zijn de mogelijkheden en beperkingen van digitale opnames bekeken. Daaruit bljkt dat een plaatsbepaling met nauwkeurigheid van 0,1 m bij een opnamehoogte van 500 m mogelijk is (ca. ¼ pixel). De relatieve fout waarmee de snelheid bepaald kan worden kan minder dan 1% zijn.

Wat betreft de opnamepositie geeft een opname vanaf een portaal of viaduct slechts beperkte mogelijkheden. In de bijlage is het resultaat van een vooronderzoek beschreven waarin deze stelling onderbouwd wordt. Een opname vanaf grote hoogte biedt meer mogelijkheden. Het gebruik van een helikopter ligt hierbij voor de hand, hoewel de stabiliteit van de helikopter een onbekende factor is, die in dit onderzoek nader onderzocht moet worden.

De lengte van het wegvak dat over enige tijd bemeten kan worden dient 500 m te bedragen. Deze lengte hangt af van:

- De hoogte waarop de waarneming plaats vindt
- De werkzame grootte van de lichtgevoelige chip
- De brandpuntsafstand van het objectief.

Er dient rekening gehouden met het verlopen van de beeldbegrenzing tijdens de opnames, zodat zelfs wanneer het waargenomen wegvak 500 m lang is, de effectieve lengte waarover waargenomen kan worden altijd korter zal zijn omdat de beeldbegrenzing van opname tot opname zal verschillen. De mate waarin dit het waarnemingsgebied verkleind zal ook in dit onderzoek moeten blijken.

Wat betreft de duur van een metingserie zijn de specificaties van de kant van de toekomstige gebruikers (de modelontwikkelaars) nog niet concreet. Dit onderzoek zal in ieder geval duidelijk moeten maken hoe lange meetperiodes realiseerbaar zijn met de gebruikte technieken en welke factoren die tijdsduur in eerste instantie beperken.

Een belangrijke eis is dat de camera gedurende langere tijd actief kan zijn zonder dat er geheugen-beperkingen optreden. Hierbij geldt dat drastische beeldcompressie ongewenst is, omdat die de automatische beeldanalyse sterk bemoeilijkt. De camera moet daarom de opnamen naar een PC (of ander opslagmedium) kunnen zenden zonder de opnamereeks te onderbreken. Een interessante eigenschap van sommige camera's is de *partial scan* optie, waarmee een relevant (rechthoekig) deel van de opnamen voor opslag geselecteerd kan worden: wel de snelweg, maar niet de weilanden. De toepasbaarheid van deze optie hangt sterk samen met de stabiliteit van de helikopter en is gezien de slingeringen die bij het eerste onderzoek optraden, nog niet aan de orde.

3 Methodiek, meetmethoden en apparatuur

Voor het uitvoeren van de metingen is gekozen voor een waarnemingssysteem vanuit de lucht, bestaande uit een digitale camera gemonteerd aan een helikopter. Aan de camera werden hoge eisen gesteld ten aanzien van beeldresolutie en een opnamefrequentie. De beeldresolutie is nodig om het beoogde traject van 500m met de vereiste ruimtelijke resolutie van 40cm te kunnen bedekken. De benodigde opnamefrequentie volgt uit de eisen die gesteld worden aan de nauwkeurigheid van de schattingen van de snelheid en de accelaratie van de opgenomen voertuigen, aan de hand van hun posities in opeenvolgende beelden.

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens het camerasysteem, de gebruikte computer en de software nader beschreven. Ook worden enkele facetten ten aanzien van de helikopter belicht. Tenslotte wordt aandacht besteed aan enkele omstandigheden tijdens de opname. Tijdens de beschrijving wordt tevens getracht een goed beeld te geven van diverse factoren die in de bereikte resultaten een rol gespeeld hebben.

3.1 Camerasysteem

De gekozen camera is van het type Basler 101f met een beeldresolutie van 1300 x 1030 pixels en een maximum frame rate van 11.6 beelden per seconde (11.6 fps). Deze camera heeft zelf geen geheugen voor de opslag van beelden. De hoeveelheid gegenereerde beeldgegevens is te groot om in een intern geheugen opgeslagen te kunnen worden, temeer omdat het tijdens de beeldanalyse wenselijk is dat er geen "lossy" beeldcompressie heeft plaatsgevonden. In plaats daarvan is de camera via een speciale frame-grabber verbonden met een snelle PC die de ongecomprimeerde gegevens real-time opslaat op een harde schijf.

Het systeem, inclusief de PC, de frame-grabber en de bekabeling, is gehuurd bij de firma DVC te Breda.

De digitale camera Basler A101f wordt gekenmerkt door een hoge lichtgevoeligheid, waardoor een korte integratietijd (sluitertijd) mogelijk is Dit voorkomt onscherpte ten gevolge van de snelheid van voertuigen en trillingen van de helikopter.

De maximale beeldfrequentie van 11.6 fps geldt voor de volledige beeldresolutie van 1030 beeldlijnen en 1300 kolommen. De camera kan ook in *partial scan mode* werken, waarbij minder lijnen opgenomen worden; het aantal kolommen blijft hetzelfde. Als de snelweg van links naar rechts door het beeld loopt, kan de partial scan mode gebruikt worden om het beeld "langwerpiger" te maken en minder van de omgeving op te nemen. Dan kan de opname frequentie nog hoger gekozen worden (wat in dit geval niet nodig bleek), of de hoeveelheid gegenereerde data gereduceerd worden. Zoals eerder vermeld stelt het gebruik van deze optie vrij hoge eisen aan de stabiliteit van de helikopter. Bovendien is het van groot belang dat gedurende de meting de piloot precies weet wat wordt opgenomen. Derhalve is in dit geval het gebruik van een tweede camera noodzakelijk.

De camera neemt grijswaarde-beelden op ("zwart-wit"). Er bestaat ook een RGB (kleur) uitvoering van de camera, de A101c. Daarvoor is niet gekozen, om de volgende redenen:

- De kleurenuitvoering gebruikt een zogeheten Bayer-filter om uit gebiedjes van 2x 2 pixels steeds 1 kleurpixel te vormen. De effectieve beeldresolutie bedraagt dan slechts 650 x 515 pixels. Deze worden weliswaar al in de camera ge-*resampled* naar 1300 x 1030 pixels, maar dit behelst een interpolatie die ten koste gaat van de scherpte.
- Het argument dat de detectie van voertuigen in kleuropnames wellicht betrouwbaarder is, is niet doorslaggevend. Er zijn witte, zwarte en grijze auto's, die tegen de grijze achtergrond van het wegdek ook gedetecteerd moeten worden. Als dit in een zwart-wit opname niet lukt, dan lukt het in een kleurenopname ook niet.

- De hoeveelheid gegenereerde gegevens is bij kleur hoger, en de algoritmes worden complexer.

Een belangrijke keuze is die van de cameraconstante (brandpuntsafstand). Deze bepaalt de openingshoek en daarmee de lengte van het op te nemen traject bij een bepaalde vlieghoogte. Er is gekozen voor een vlieghoogte van 500 m, dus ongeveer gelijk aan de lengte van het op te nemen gebied van 1300 pixels x 40 cm = 520 m. Daarmee wordt de brandpuntsafstand gelijk aan de lengte van de sensor in de camera. De overwegingen waren dat bij een grotere hoogte de kans toe zou nemen om in de eventuele bewolking terecht te komen, en het bovendien moeilijker zou worden om een stabiel beeld te krijgen. Anderzijds, met een grotere openingshoek vanaf een geringere hoogte zou de perspectivische vertekening aan de uiteinden van het op te nemen traject wellicht te sterk worden.

Op grond van deze overwegingen, en omdat de camera volgens de documentatie voorzien is van een 2/3" chip, leverde DVC de camera met een lens van 16 mm.

Er is een proefcamera ter beschikking gesteld met een 50 mm lens, dus met een veel kleinere openingshoek. Het definitieve systeem met de 16 mm lens werd pas twee dagen voor de vlucht geleverd en vereiste toen nog enkele tijdrovende softwarematige aanpassingen (zie hieronder). Ook bleek een van de geleverde kabels te kort, zodat daar een nieuwe voor gemaakt moest worden.

Zodoende werd pas tijdens de vlucht duidelijk dat het opgenomen traject beduidend kleiner was dan de gewenste 500 m. Hoger gaan vliegen was niet mogelijk in verband met de bewolking. Na terugkomst bleek bij inspectie van de camera dat het lichtgevoelig oppervlak van de sensor beduidend kleiner dan 16 mm is. Inmiddels weten we dat met een 2/3" sensor doorgaans bedoeld wordt dat dit oppervlak 6.6 mm x 8.8 mm groot is, hoe onlogisch dit ook moge klinken. Voor de gewenste vlieghoogte en trajectlengte is een lens van ca. 9 mm benodigd. Het gevolg van het gebruik van de 16 mm lens is dat er een korter stuk weg is opgenomen dan gepland was: ca. 280 m in plaats van 500 m. Bovendien zijn de geometrische verstoringen ten gevolge van de bewegingen van de helikopter hierdoor ernstiger dan anders het geval was geweest.

3.2 Computersysteem

Volgens de offerte van de firma DVC zou het systeem geleverd worden met een *Foresight Imaging Acquisition Box*: een PC in een zeer kleine behuizing (ca. 25 x 25 x 10 cm) met een ingebouwde frame grabber. Deze zou zeer geschikt zijn voor inbouw in een helikopter. Helaas raakte het beoogde exemplaar enkele dagen voor de vlucht defect en was er geen ander beschikbaar. Daardoor werd er uitgeweken naar een gewone desktop-PC, hetgeen tijdens de inbouw in de helikopter overigens geen probleem was.

Ook de geleverde software was niet geheel conform de oorspronkelijke afspraken. Dit bracht het een ander type interface met zich mee, waardoor de bekabeling complexer werd. Na de vlucht is gebleken dat in sommige van de opgenomen reeksen niet alle opnames foutloos zijn. Aangezien dit effect tijdens het testen van het systeem voorafgaand aan de vlucht niet optrad en ook naderhand niet gereproduceerd kon worden, bestaat het vermoeden dat trillingen in het systeem, met name in een van de vele kabelbevestigingen, hier debet aan zijn geweest.

3.3 Software

Het software-systeem, genaamd DAS (Digital Acquisition System), verzorgt de besturing van de camera, het binnenhalen van de beelden en de opslag daarvan op de harde schijf van de computer. Als de camera is ingeschakeld, toont de software het waargenomen beeld op het scherm van de computer.

De software gebruikt 1 schermpixel per beeldpixel. Omdat de beeldresolutie van de camera groter is dan de maximale grootte van het window op het scherm, is het niet mogelijk om het hele beeld te tonen. Men kan wel scrollen, maar niet in- of uitzoomen.

Men ziet het beeld helaas niet tijdens de opnamen, wanneer de beelden tevens op de schijf van de computer moeten worden opgeslagen. Het is dan dus niet mogelijk om de opnamen op het scherm te controleren!

Zolang er niet opgenomen wordt, kan op grond van het getoonde beeld de integratietijd worden gekozen en via de software handmatig ingesteld. Er is geen automatische belichtingsregeling. De camera kent instellingen voor *gain* en *offset* waarmee de helderheid en het contrast kunnen worden bijgeregeld. Dit is ongetwijfeld nuttig bij real-time toepassingen, maar indien beeldbewerking achteraf mogelijk is, zoals in dit project, is deze functie overbodig en zelfs hinderlijk: verkeerde instellingen kunnen achteraf niet altijd teruggedraaid worden. Helaas is het niet mogelijk deze functie uit te schakelen of een *default*-waarde te kiezen.

De camera heeft verschillende modi om de beeldfrequentie te regelen: full speed, via een externe trigger, of programmeerbaar. Het bleek dat full speed neerkwam op slechts 8.6 fps. In de programmeerbare modus bleek maximaal slechts 6 fps haalbaar. Hogere waardes konden weliswaar softwarematig ingesteld worden, maar dan begon de camera beelden over te slaan. Voor *partial scan* is de programmeerbare modus vereist. Ook dan is de maximale frequentie 6fps. De hogere frequenties die de camera met partial scan zou kunnen bereiken, worden blijkbaar door de software niet ondersteund.

Om de opslag van de beelden in real-time plaats te laten vinden, reserveert de software vooraf een stuk vrije schijfruimte (partitie). Hierin kan één beeldreeks worden opgeslagen. Een eventuele tweede beeldreeks overschrijft de eerste. Aangezien er meer beeldreeksen opgenomen gingen worden, moesten er vooraf een aantal partities gereserveerd worden. De software ondersteunt het gebruik van meerdere partities niet, zodat hiervoor een methode bedacht en grondig getest moest worden. Bovendien duurt het reserveren van de schijfruimte langer dan de duur van de opname die erin past (dit is de reden om vooraf te reserveren). Het alternatief zou zijn om gedurende de vlucht, tussen de opnames door, de beelden te kopiëren. Dit duurt echter ook langer dan het opnemen zelf. Derhalve is ervoor gekozen één complete beeldreeks op te nemen.

3.4 Helikopter en gyroscopische mounting

De gebruikte helikopter is van het type Bell 206 JetRanger van de firma Heli Holland te Emmercompascuum. Een dependance van deze firma bevindt zich op de luchthaven Lelystad, van waaruit de vlucht gemaakt werd.

Een belangrijk aandeel van de omzet van Heli Holland wordt geboekt met helikopterverhuur voor foto- en filmopnames. Tijdens een voorbespreking gaf Heli Holland aan dat het niet moeilijk zou zijn om een stuk weg van 500 m lang vanaf een hoogte van 500 m continu in beeld te houden. Echter, om een zeer stabiel beeld te krijgen gebruikt men bij film- en video-opnames gyroscopisch gestabiliseerde *mounts*. Dan is het van belang dat de combinatie mount / camera op elkaar is afgestemd en dat is alleen met bepaalde cameratypen het geval.

Wij verwachtten zo'n gestabiliseerde mount niet nodig te hebben, omdat het langs fotogrammetrische weg mogelijk is om de beelden achteraf te stabiliseren. Hierbij is echter geen rekening te houden met de eventuele verkleining van het effectieve beeldvlak (vlak dat gedurende een behoorlijke periode in beeld blijft). Het belangrijkste verschil met de meer gangbare helikopteropnames (zoals reportages van wielerwedstrijden) is in dit verband (a) dat wij vanaf een vast standpunt een vast traject op wilden nemen en (b) dat real-time verwerking voor ons niet noodzakelijk is.

Figuur 1 Bell Jetranger 206

In tegenstelling tot wat men wellicht verwacht, is windstil weer niet ideaal om lange tijd stil te hangen met een helikopter. De instelling van het rotorsysteem is dan niet optimaal, waardoor extra trillingen ontstaan. Beter is om enige snelheid ten opzichte van de lucht te hebben, dus om "tegen de wind in" te hangen op een vast punt boven de grond. Deze wind hoeft niet recht van voren te komen; zijwind is even goed.

4 Methodiek van de gegevensanalyse

Het doel van de gegevensanalyse is om uit een opgenomen beeldreeks automatisch trajectoriën af te leiden van alle in de reeks voorkomende voertuigen. Voorafgaand aan de eigenlijke analyse dient een aantal voorbereidende beeldbewerkingoperaties uitgevoerd te worden, die voornamelijk als doel hebben de individuele beelden in de reeks zowel geometrisch als radiometrisch met elkaar in overeenstemming te brengen. Nadat de analyse is voltooid, moeten de resultaten worden weggeschreven in een vorm die geschikt is voor verdere (verkeerskundige) analyse.

In dit hoofdstuk worden alle afzonderlijke stappen beschreven. Allereerst is een beeldreeks geselecteerd aan de hand waarvan de methodiek ontwikkeld en getest kon worden. Bij de presentatie van de resultaten wordt ook een tweede reeks in beschouwing genomen.

4.1 Selectie beeldreeks

In de hierna volgende beschrijving is sprake van één beeldreeks. Door de tegenvallende opnamekwaliteit tengevolge van de sterke bewegingen van de helikopter, de heiige weersomstandigheden en de variërende lichtcondities in alle opgenomen beeldreeksen, zijn de beeldbewerkings- en beeldanalysemethode ontwikkeld aan de hand van een reeks waarin de kwaliteit nog enigszins acceptabel is. Bovendien komen in de geselecteerde reeks geen foutieve opnames (zie hoofdstuk 5) voor.

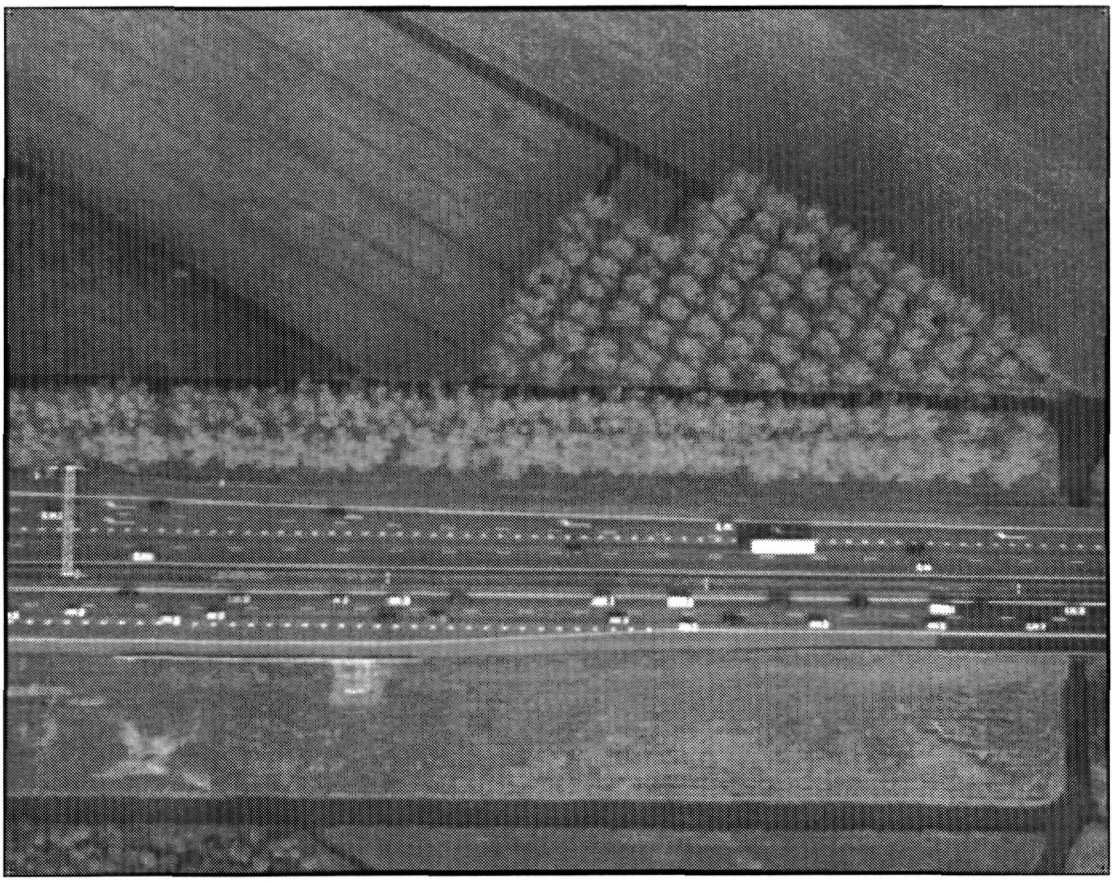
4.2 Correctie voor lensvertekening

Een bekende geometrische verstoring in fotografische opnames wordt veroorzaakt door lensvertekening. Deze verstoring is bij lenzen met een vast brandpunt doorgaans klein (minder dan 1%) en verloopt bovendien zeer vloeiend over het beeld: de fout in de gemeten afstand tussen twee objecten die dicht bij elkaar liggen is derhalve verwaarloosbaar.

Doordat de positie en de stand van de helikopter, tengevolge van de wind, binnen de beeldreeks zeer sterk varieerden, was het ontschranken van de beelden (zie hieronder) veel moeilijker dan verwacht. Bovendien had deze variatie tot gevolg dat de lensvertekening tijdens het ontschranken toch tot een te grote verstoring leidde, hetgeen ook de verdere verwerkingsstappen zeer bemoeilijkte.

Daarom was het noodzakelijk om de lensvertekening te bepalen en een correctie uit te voeren. Hierbij trad een radiale (tonvormige) vertekening aan het licht. De hoeken van het beeld liggen ca. 7 pixels teveel naar "binnen" – dit is 1% van de afstand tussen het beeldcentrum en deze hoeken. Figuur 2 geeft de vertekening van het beeld (na correctie) weer.

Dit verklaart de ontschrankingsproblemen afdoende. Het opgenomen wegvak ligt in sommige beelden aan de bovenkant en in andere aan de onderkant, waardoor krommingen ontstaan die in verschillende richtingen lopen. Inderdaad bleek de ontschranking na lensvertekenings-correctie weliswaar niet gemakkelijker, maar wel veel nauwkeuriger uitgevoerd te kunnen worden.



Figuur 2 Na correctie voor lensvertekening wordt het beeld "kussenvormig" weergegeven. Dit is met name aan de verdikkingen van de zwarte lijnen aan de rand van de figuur te zien.

4.3 Ontschranking

In een luchtopname van een horizontaal rechthoekig object zal dit object ook als rechthoek worden afgebeeld, indien de camera zich precies boven het midden van de rechthoek bevindt en de opname precies verticaal gemaakt wordt (afgezien van lensvertekening). In andere gevallen treedt perspectivische vervorming op, die dus afhangt van de afwijking in de positie van de camera (t.o.v. het midden van de rechthoek) en de stand van de camera (t.o.v. verticaal). Bovendien varieert de grootte van de afgebeelde rechthoek met de afstand tot de camera (de vlieghoogte), en varieert de hoek van de afbeelding t.o.v. de zijden van de opname met de hoek van de camera t.o.v. de verticale as.

Al deze variaties (perspectivische vervorming, schaalverschil en rotatie), die aan het licht treden bij het vergelijken van verschillende opnames van hetzelfde terrein, kunnen geëlimineerd worden door een *projectieve transformatie* uit te voeren. Dit proces wordt ook wel *ontschranken* genoemd.

Tijdens het ontschranken is het mogelijk (maar niet noodzakelijk) om tegelijkertijd een *georeferencing* uit te voeren. In dat geval worden de opnames geprojecteerd naar een coördinatensysteem in het terrein. Vervolgens is van elk pixel in het getransformeerde beeld de terreincoördinaat bekend.

De andere mogelijkheid, die hier gevolgd werd, is om de opnames te projecteren op het beeldcoördinatensysteem van een geselecteerde opname, het referentiebeeld. Na deze

projectie passen beide opnames precies op elkaar: een punt in het terrein wordt op dezelfde plaats afgebeeld in beide opnames. Preciezer gezegd geldt dit alleen voor punten in een bepaald vlak in de objectruimte (het terrein), het *referentievlak*. Dit zal het vlak worden waarin het wegdek ligt – de positie van de bovenkant van een lantarenpaal kan in beide opnames nog verschillen. Het verband tussen beeld- en terreincoördinaten wordt bij deze methode later vastgelegd.

Ontschranken van een opname naar een referentiebeeld kan geheel automatisch worden uitgevoerd, mits men de beschikking heeft over gegevens omtrent de precieze positie en stand van de camera tijdens beide opnames. Dit vereist GPS en INS (Inertial Navigation System) navigatieapparatuur, die zeer kostbaar is. Een geïntegreerd GPS/INS systeem kost tientallen malen meer dan het door ons gebruikte camerasysteem.

Bij afwezigheid hiervan, zoals in het onderhavige geval, moet gebruik gemaakt worden van *paspunten*. Dit zijn punten die in beide opnames zichtbaar zijn en waarvan de beeldcoördinaten in beide opnames bepaald worden. In principe zijn 4 paspunten nodig om de parameters van de transformatie te bepalen. Omdat de bepaling van paspuntcoördinaten niet absoluut nauwkeurig is, worden in de praktijk meer (10 tot 30) paspunten gebruikt. Daarmee krijgt men tevens een schatting van de nauwkeurigheid, van zowel het hele proces als de individuele paspunten. Foutieve paspunten kunnen op grond daarvan verwijderd of gecorrigeerd worden.

De paspunten dienen in de 3-dimensionale objectruimte zoveel mogelijk in een vlak te liggen. Anders gezegd, het vlak dat het beste door alle paspunten "gefit" kan worden, wordt automatisch het referentievlak voor de transformatie.

Automatische paspuntoverdracht
In verband met het grote aantal beelden is het ongewenst dat de paspunten in elk beeld "met de hand" gemeten moeten worden. Daarom zijn alleen punten gemeten in het referentiebeeld R. De positie van deze punten in de andere beelden wordt automatisch bepaald. Behalve werkbesparing levert dat nauwkeurigheid op. Gegeven de positie van een punt in beeld R kan met behulp van *kleinste-kwadraten matching* (in het vervolg *finematch* genoemd) de positie van hetzelfde punt in een ander beeld met een nauwkeurigheid van 0,1 pixel bepaald worden. Een vereiste is evenwel dat de positie al op 1 a 2 pixels nauwkeurig bekend moet zijn, alvorens deze methode toegepast kan worden.

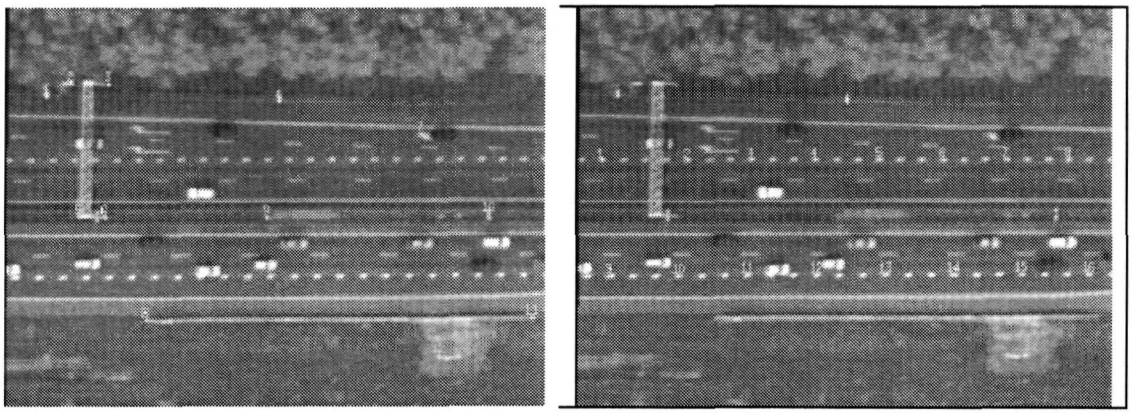
Door de grote geometrische verschillen tussen de beelden binnen de reeks, tengevolge van de wind tijdens het opnemen, ligt een punt in sommige beelden honderden pixels verwijderd van hetzelfde punt in het referentiebeeld. Tussen twee opeenvolgende beelden in de reeks zijn de verschillen kleiner: maximaal enkele tientallen pixels. Als uitgangspunt voor *finematch* is dat nog steeds teveel.

Voor de algehele automatische paspuntoverdracht is daarom een proces ontwikkeld dat in drie fasen verloopt. Het gaat ervan uit dat bij het bepalen van de paspuntcoördinaten in beeld I, deze in beeld I-1 reeds bekend zijn (voorzover ze niet buiten het beeld vallen). Met dit proces worden, uitgaande van het referentiebeeld R alle navolgende beelden behandeld, tot aan het einde van de reeks.

Aangezien R niet het eerste beeld van de reeks is, wordt daarna uitgaande van R teruggewerkt om de beelden die aan R voorafgingen te behandelen. Dan wordt er dus steeds vanuit gegaan dat bij het behandelen van beeld I de paspuntcoördinaten in I+1 bekend zijn – in de navolgende beschrijving wordt dit niet expliciet genoemd, maar wordt alleen de voorwaartse bewerking beschreven.

Er is gebruik gemaakt van twee verzamelingen paspunten. Bij de eerste is het vooral van belang dat de punten karakteristiek zijn in een vrij grote omgeving: binnen een gebied van 50x50 pixels mag geen soortgelijk punt voorkomen. Dit zijn vooral punten rondom de

weg: lantarens, de zijkanten van een portaal, uiteinden van de vangrail, praatpalen, hoeken in slootkanten etc. In de tweede verzameling worden alleen punten gebruikt die op het wegdek (het referentievlak) liggen, met name de witte vierkante blokken tussen de hoofdrijbaan en de in- en uitvoegstroken. Die zijn verre van karakteristiek, maar ze worden alleen gebruikt als de positie al op enkele pixels nauwkeurig bekend is, zodat geen verwarring kan ontstaan.



Figuur 3 Twee paspuntverzamelingen: karakterisitieke (links) en wegdekpunten (rechts)

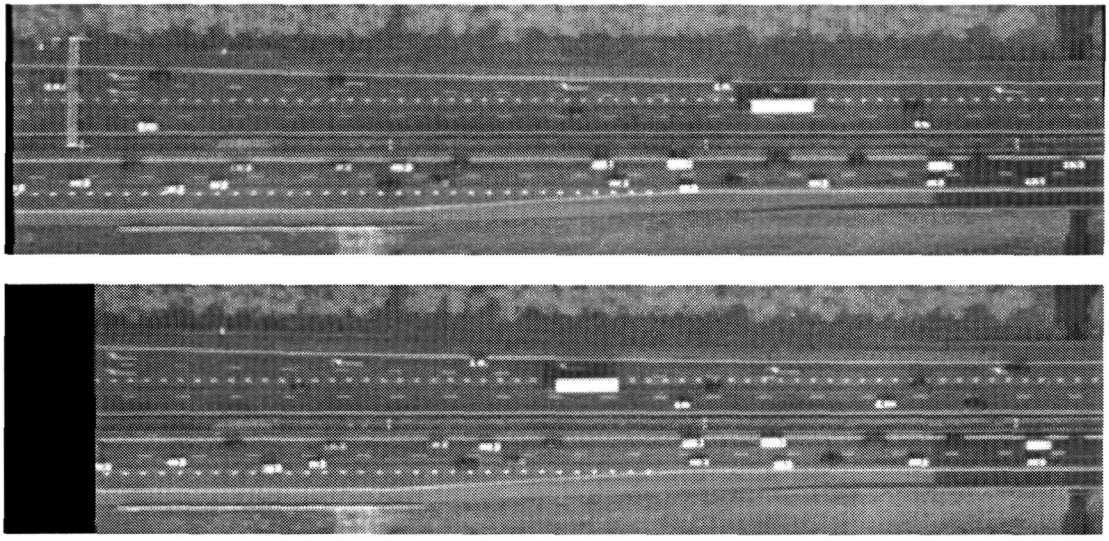
De drie fasen van het proces zijn:

1. Er is een zoekalgoritme, genaamd *coarsematch,* vervaardigd dat punten die in een opname gegeven zijn in een andere opname terug kan vinden, mits de posities in die andere opname ruwweg bekend zijn – de grootte van "zoekwindow" is een parameter van het algoritme. Het is gebaseerd op het maximaliseren van de kruiscorrelatie-coëfficiënt van overeenkomstige pixels in een omgeving rond het gezochte punt in beide beelden. De nauwkeurigheid van het resultaat is ca.1 pixel. Hiermee wordt de positie van de "karakteristieke" paspunten van beeld *I*-1 in beeld *I* bepaald met een zoekwindow van 50 x 50 pixels, waarna de transformatie van beeld *I*-1 naar beeld *I* berekend wordt. Voorzover deze te onnauwkeurig is (drempelwaarde), worden foutieve punten automatisch verwijderd. Dit gebeurt iteratief.
2. Nu de transformatie-parameters tussen beeld *I*-1 en beeld *I* (ruwweg) bekend zijn, terwijl de posities van de wegdekpaspunten (de tweede verzameling) in beeld *I*-1 al nauwkeurig bekend waren, kunnen de posities van deze punten in beeld *I* bij benadering voorspeld worden. Nu wordt wederom een *coarsematch* uitgevoerd met deze punten, tussen het referentiebeeld *R* en beeld *I*. Het zoekwindow is 7x 7 pixels, dat is minder dan de afstand tussen twee naast elkaar liggende blokken. Dit levert, wederom iteratief, een betere benadering op van de positie van deze punten in beeld *I*.
3. Uitgaande van deze benadering kan een *finematch* tussen *R* en *I* uitgevoerd worden. Daarna zijn de transformatie-parameters tussen *R* en *I* nauwkeurig bekend.

Met de aldus bepaalde transformatieparameters kan de positie in beeld *I* van alle paspunten nauwkeurig berekend worden. Dit geldt ook voor punten die tijdens het matchen gemist werden, bijvoorbeeld omdat er net een auto overheen rijdt.

Nu kan beeld *I*+1 behandeld worden. Omdat het proces in de derde fase bij elk beeld teruggrijpt op hetzelfde referentiebeeld blijft de nauwkeurigheid gedurende de hele reeks gelijk.

Het ontschrankingsproces is zeer robuust en levert ook bij heftige camerabewegingen, zoals deze tijdens de opnamen optraden, een stabiel resultaat.



Figuur 4 Ontschrankte beelden

4.4 Radiometrische correctie

Doordat de lichtcondities tijdens de opnamen varieerden, zijn sommige opnames lichter dan andere. De voertuigdetectie (hieronder beschreven) is gebaseerd op intensiteitverschillen tussen de individuele beelden en een achtergrondbeeld (een berekend beeld van de snelweg zonder voertuigen). De vergelijking is nogal kritisch en wordt ernstig verstoord door algehele intensiteitsverschillen tussen de beelden in de reeks.

Daarom is besloten te beelden eerst te normaliseren, teneinde belichtingsverschillen te compenseren. De gebruikte methode is *histogram matching*. Op grond van de histogrammen van het te corrigeren beeld en een referentiebeeld worden de pixelwaardes zodanig aangepast dat na afloop de histogrammen zoveel mogelijk overeenkomen. Dit is een niet-parametrische methode, wat als voordeel heeft dat er geen expliciete schatting van de belichting nodig is.

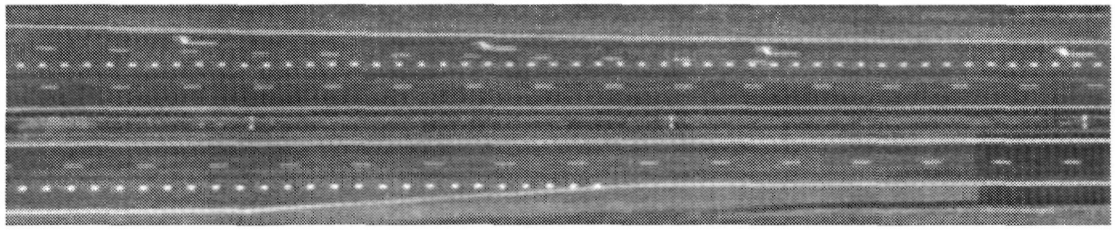
4.5 Selectie subset

Er is een gebied geselecteerd dat geheel bedekt wordt door elke opname in de reeks. Door de sterke bewegingen van de helikopter heeft dit tot gevolg dat het onderzochte traject significant korter wordt (van ca. 280 m naar ca. 210 m). Bij een stabielere camerapositie zou het verlies veel kleiner zijn geweest.

Het vervolg van het proces wordt hierdoor veel eenvoudiger. Zo wordt het mogelijk om de hele reeks te gebruiken voor de berekening van het achtergrondbeeld.

4.6 Berekenen achtergrondbeeld

In deze stap wordt het achtergrondbeeld gegenereerd, een beeld van de weg zonder de voertuigen. Het achtergrondbeeld wordt pixel voor pixel opgebouwd, waarbij telkens gekeken wordt naar de waardes van pixels op de overeenkomstige positie in een groot aantal beelden in de reeks. De mediaan van deze waardes wordt in het achtergrondbeeld geplaatst.



Figuur 5 Achtergrondbeeld

Deze methode gaat ervan uit dat een bepaald punt op het wegdek steeds dezelfde reflectie heeft, hetgeen zeker na de radiometrische correctie redelijk is. Bovendien moet de weg voor minder dan de helft "bedekt" zijn met bewegende voertuigen, zodat elk punt van het wegdek in meer dan de helft van de opnames zichtbaar is. Deze voorwaarde kan nog wat afgezwakt worden indien men bedenkt dat sommige voertuigpixels lichter zijn dan het wegdek en andere donkerder. Bij het beschouwen van een groot aantal metingen van 1 punt op verschillende tijdstippen zullen de waardes van de wegdekpixels na sortering in het midden van de reeks terechtkomen, en die van de voertuigpixels aan de uiteinden. De mediaanwaarde betreft dan hoogstwaarschijnlijk een wegdekpixel.

Indien aan deze voorwaarde niet voldaan wordt (bij een stilstaande file waarin de voertuigen vlak achter elkaar staan), kunnen morfologische operaties gebruikt worden om het wel gevonden deel van het wegdek te expanderen. Dit hoefde nu niet.

4.7 Voertuigdetectie

Voertuigdetectie in een bepaald beeld is gebaseerd op het verschil tussen het beeld en het achtergrondbeeld. In eerste benadering volstaat een drempelwaarde op het verschil om voor elk pixel te beslissen of het al dan niet tot een voertuig behoort. Een groep aangrenzende "voertuigpixels" kan vervolgens als voertuig bestempeld worden.

Voor voertuigen die als geheel lichter zijn dan het wegdek werkt dit uitstekend. In de praktijk treden diverse complicaties op:

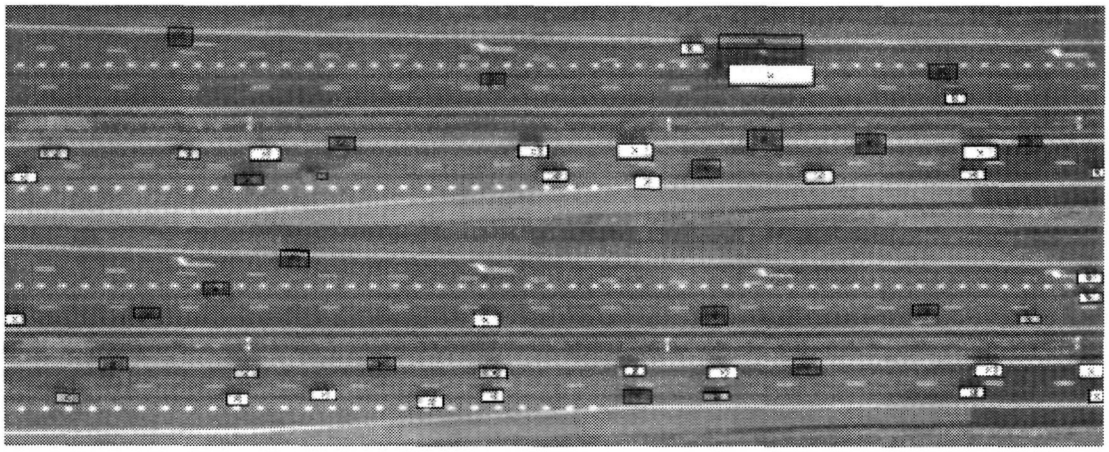
- Zowel lichte als donkere voertuigen geven schaduwen te zien. Deze zijn ook donkerder dan het wegdek. Gezien de mate van bewolking tijdens de opname zijn deze schaduwen niet scherp begrensd, maar wel onstaat er naast elk voertuig (steeds aan dezelfde kant, in het beeld boven het voertuig) een donkere vlek.
- Lichte voertuigen hebben donkere plekken (bijvoorbeeld de voor- en achterruit)
- De grijswaarde van het wegdek zelf is variabel. De gebruikte methode (verschil tussen beeld en achtergrondbeeld) is hier in principe ongevoelig voor, maar bij grote intensiteitsvariaties op het wegdek treden er juist op de plaats van een voertuig ook grote variaties op in het verschilbeeld. Ook schaduwen geven een groter verschil met het achtergrondbeeld op lichte stukken van de weg dan op donkere. Deze effecten zijn het sterkst op zeer lichte wegdek-elementen zoals de belijning en de pijlen.
- Soms rijdt een klein voertuig (personenauto) geheel in de schaduw van een groot (vrachtauto). Het kleine voertuig heeft dan zelf geen schaduw meer. Indien het een vrij licht voertuig betreft, komt zijn intensiteit in het beeld erg dicht in de buurt van het achtergrondbeeld.

Een groot probleem wordt gevormd door voertuigen die dezelfde helderheid hebben als het wegdek, of dezelfde helderheid als hun schaduw. Elke *straightforward* detectiemethode zal in dergelijke gevallen de schaduwvlek detecteren in plaats van het voertuig zelf.

Er is geëxperimenteerd met diverse manieren om deze problemen op te lossen: Convoluties, morfologische grijswaarden-operaties, binaire morfologische operaties, *split and merge* beeldsegmentatie, alsmede combinaties hiervan. Bijlagen A beschrijft de code

en de toegespaste algoritmes. Hiermee worden vrijwel alle voertuigen gedetecteerd. Resterende problemen liggen in de bepaling van de juiste voertuigposities en –afmetingen.

Het resultaat van de detectiestap is een tabel met daarin voor elk voertuig de (rij,kolom)-positie, alsmede de lengte en breedte van het voertuig, uitgedrukt in pixels. Deze gegevens kunnen in het beeld gevisualiseerd worden



Figuur 6 Voertuigposities en –afmetingen uit voertuigdetectie. Alle voertuigen worden gedetecteerd. Sommige posities en afmetingen zijn onnauwkeurig. In het bovenste beeld vind een valse detectie plaats (detectie van schaduw i.p.v. voertuig).

Nogmaals dient opgemerkt te worden dat de beeldkwaliteit tengevolge van de heiige weersomstandigheden laag is, en onvoldoende voor een perfecte voertuigdetectie. Daarom is verder experimenteren met het huidige opnamemateriaal niet zinvol. Om toch *met het huidige materiaal* een kwalitatief hoogstaand resultaat uit deze opnames te halen, zou een handmatige completering van de detectie wellicht verstandiger zijn.

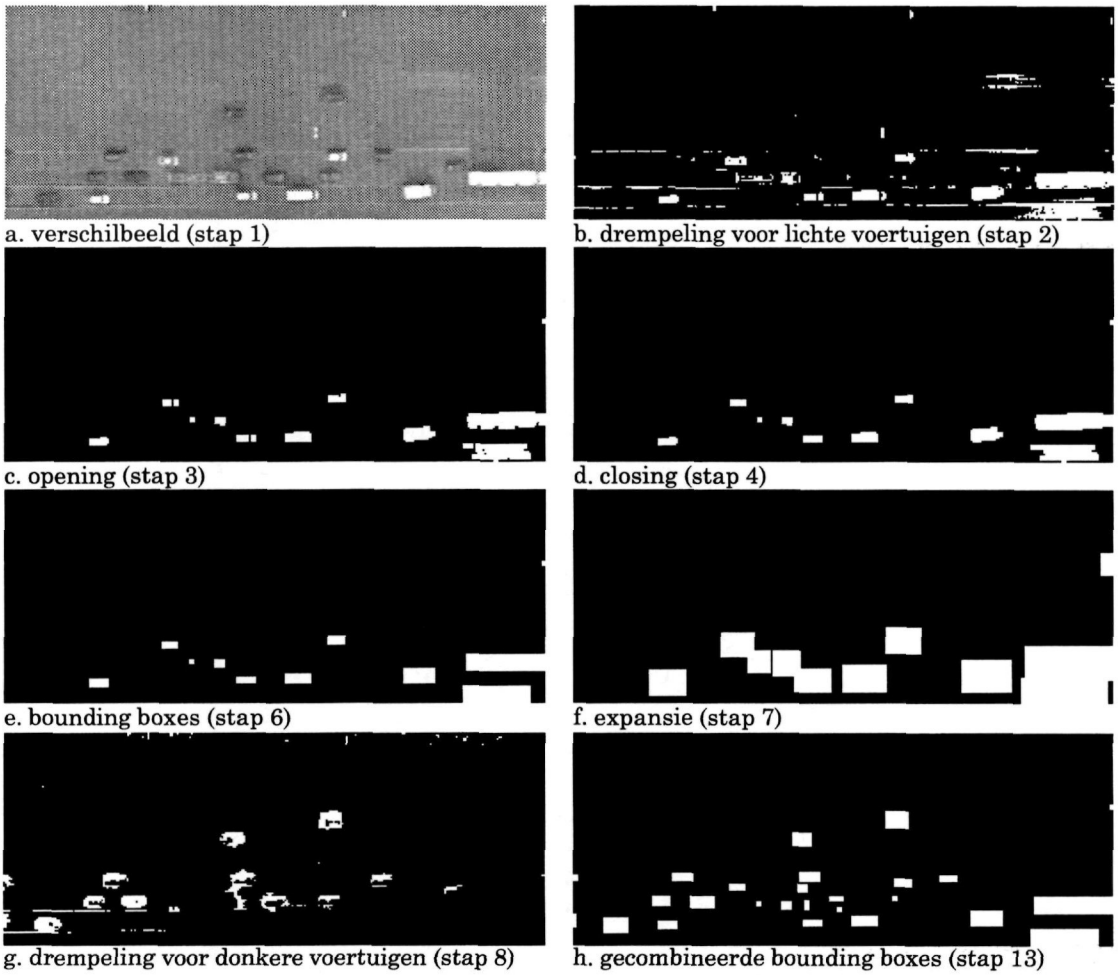
4.7.1 Het gebruikte detectie-algoritme

Het algoritme voor de detectie van voertuigen in een beeld B bestaat uit de volgende stappen.

1. Berekening van het verschilbeeld $D = B - A + 127$. Hierin is A het achtergrondbeeld, dat volgens de methode in de vorige paragraaf is berekend. De offset 127 dient om het resultaat naar het midden van het grijswaardenbereik [0...255] te verplaatsen, zodat zowel lichte als donkere voertuigen (relatief t.o.v. het wegdek) nog zichtbaar zijn.
2. Drempeling om lichte voertugen te detecteren. Het resultaat is een binair beeld L, waarin pixels die in D een waarde boven de drempelwaarde (140) hebben, de waarde 1 krijgen, en de overige pixels de waarde 0. Aaneengesloten gebiedjes van pixels met de waarde 1 worden hierna *segmenten* genoemd.
3. Morfologische *opening* om kleine segmenten te verwijderen. Segmenten die veel kleiner dan een voertuig zijn, worden geacht het gevolg van ruis te zijn, o.a. ten gevolge van kleine verschuivingen (in de orde van 1 pixel) tussen B en A.
4. Morfologische *closing* om bij voertuigen die in twee of meer segmenten uiteen zijn gevallen, deze weer met elkaar te verbinden. Hiertoe is een rechthoekig *structuring element* gebruikt, waardoor segmenten die (in de richting van de snelweg) achter elkaar liggen eerder worden verbonden dan segmenten die naast elkaar liggen.
5. *Connected component labeling* van het resultaat van 4. Hierdoor krijg elk segment een uniek nummer.
6. Bepaling van *bounding boxes,* dit zijn rechthoekige segmenten die de onregelmatig gevormde segmenten uit stap 5 precies bedekken. Dit levert de lichte voertuigen op.
7. Morfologische expansie *(dilatatie)* van de bounding boxes, zodanig dat zij ook de schaduwen rondom de lichte voertuigen bedekken.

8. Drempeling om de pixels van donkere voertuigen te detecteren. Dat zijn pixels die in D een pixelwaarde hebben die lager is dan de drempelwaarde (115), voorzover ze niet in de geëxpandeerde bounding boxes (schaduwen van lichte voertuigen) liggen.
9. Opening, als in stap 3.
10. Closing, als in stap 4.
11. Connected component labeling, als in stap 5
12. Bepaling van bounding boxes, als in stap 6, hetgeen nu de donkere voertuigen oplevert.
13. Combineren van de resultaten van stap 6 en stap 12. In deze stappen werd tevens een tabel geproduceerd met voor elk voertuig de positie en de afmetingen in het pixelcoördinatenstelsel. De gecombineerde lijst dient als input voor het tracking-algoritme, dat in de volgende paragraaf beschreven wordt.

Het moge duidelijk zijn dat dit algoritme nog niet optimaal is. Het grootste probleem is onderscheid te maken tussen schaduwen en donkere voertuigen. Het algoritme rekent effectief af met schaduwen rond lichte voertuigen, maar houdt geen rekening met schaduwen rond donkere voertuigen. Gedetecteerde donkere voertuigen zijn derhalve vaak te groot, omdat ze ook de schaduw omvatten, of verschoven, omdat de schaduw prominenter is dan het voertuig zelf. Ook komt het (met name in de tweede onderzochte beeldreeks, waarin de opnamen donkerder zijn dan in de eerste) voor dat twee voertuigen die zich naast elkaar bevinden slechts een segment opleveren.



a. verschilbeeld (stap 1)
b. drempeling voor lichte voertuigen (stap 2)
c. opening (stap 3)
d. closing (stap 4)
e. bounding boxes (stap 6)
f. expansie (stap 7)
g. drempeling voor donkere voertuigen (stap 8)
h. gecombineerde bounding boxes (stap 13)

Figuur 7 Het gebruikte detectiealgoritme. Het voorbeeld is afkomstig uit de tweede beeldreeks. De hierbij optredende problemen komen in Hoofdstuk 5 aan de orde.

Met betere opnames is een definitieve keuze van het detectiealgoritme mogelijk. Op grond van de reeds bereikte resultaten mag dan een detectiegraad verwacht worden die zeer dicht tegen de 100% ligt. Samen met het tracking-mechanisme (zie de volgende paragraaf) kunnen door middel van het combineren van detecties in meerdere beelden de resterende voertuigen gevonden worden.

Met betere opnames is een definitieve keuze van het detectie-algoritme mogelijk. Op grond van de reeds bereikte resultaten mag dan een detectiegraad verwacht worden die zeer dicht tegen de 100% ligt. Samen met het tracking-mechanisme (zie de volgende paragraaf) kunnen door middel van het combineren van detecties in meerdere beelden de resterende voertuigen gevonden worden.

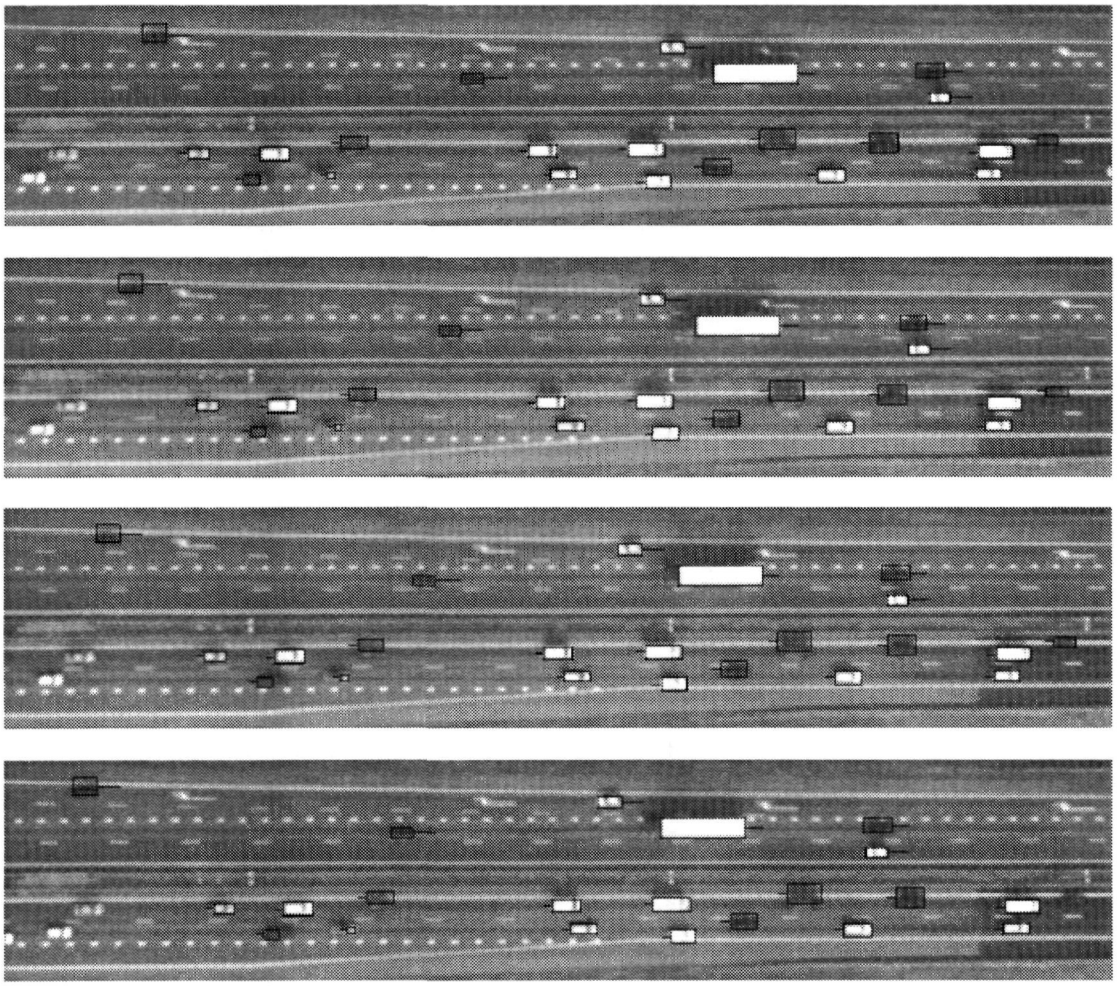
4.8 Voertuig-tracking

Het doel van voertuig-tracking is om de in de vorige stap gedetecteerde voertuigen door de beeldreeks te volgen en hun posities in de diverse beelden vast te leggen. Uit deze posities worden in de volgende stap de trajectoriën afgeleid.

In zijn algemeenheid is tracking vergelijkbaar met de automatische overdracht van paspunten, zoals beschreven in hoofdstuk 3 onder "Ontschranken". In beide gevallen moet een object waarvan de positie in een beeld bekend is, in een ander beeld worden teruggevonden. Dit gebeurt met hetzelfde soort matching-algoritmes: eerst *coarsematch* om een benaderde positie vast te stellen, gevolgd door *finematch* om de vereiste subpixel-nauwkeurigheid te behalen. Een verschil met paspuntoverdracht ligt in de grootte van de omgeving waarmee de matching wordt uitgevoerd. Die moet nu variabel zijn, aangepast aan de afmetingen van het voertuig, zoals die tijdens de detectie is vastgesteld. Een ander verschil betreft het zoekwindow, dat nu aangepast kan worden aan de maximale verplaatsing die redelijkerwijs van een voertuig verwacht kan worden tussen twee opeenvolgende beelden. Deze zal voornamelijk voorwaarts zijn en veel minder zijwaarts, waardoor een smal zoekwindow gebruikt kan worden.

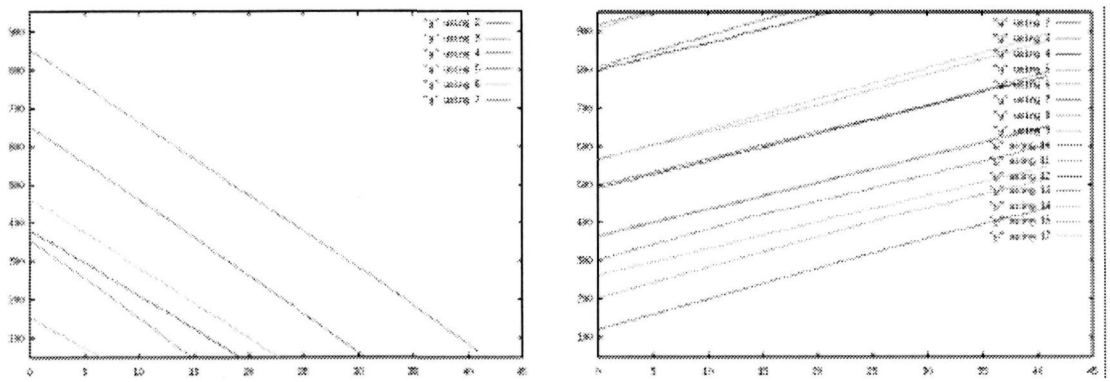
Van het hierboven beschreven proces is het *coarsematch*-gedeelte geïmplementeerd. Dit geeft goede resultaten: alle voertuigen in de onderzochte reeks worden gevolgd en de posities zijn voldoende nauwkeurig bepaald om tot *finematch* over te kunnen gaan.

De huidige implementatie levert voor elk beeld een tabel met voertuigposities. Hierin heeft elk voertuig een uniek label, zodat na samenvoeging van de tabellen de positie van elk voertuig door de reeks gevolgd kan worden. De gegevens kunnen in de beelden gevisualiseerd worden.



Figuur 8 Tracking in vier achtereenvolgende beelden. Het lijntje achter elk voertuig geeft de verplaatsing weer t.o.v. het vorige beeld. Het uiterste linker en rechterdelen van het beeld zijn niet in beschouwing genomen.

De positie van elk voertuig in de opeenvolgende beelden kan ook grafisch getoond worden. Figuur 9 geeft een indruk van de trajectoriën die zijn bepaald door het toepassen van de tracking methode.



Figuur 9 Kolomposities van voertuigen (y-as) in 40 achtereenvolgende beelden (genummerd op de x-as). De posities zijn in pixelcoordinaten. De linker grafiek betreft voertuigen die van rechts naar links door het beeld rijden, op de rijstrook boven in het beeld, de rechter grafiek bevat de voertuigen op de rijstrook beneden in beeld.

Om de nauwkeurigheid van de resultaten te verhogen kan, zoals eerder opgemerkt, *finematch* geimplementeerd worden. Ook dient aandacht besteed te worden aan de verwarring die kan ontstaan als twee dezelfde voertuigen dicht bij elkaar rijden, bijvoorbeeld in situaties met zware congestie.

4.9 Coordinaat-conversie voertuigposities en -afmetingen

Tot nu toe vonden alle berekening plaats in beeldcoördinaten: posities werden gegeven in als rijen en kolommen, en voertuigafmetingen in aantallen pixels. Voor de conversie naar een terrestrisch coördinatensysteem, dat gerelateerd is aan het wegtraject, is een geocoding nodig van de beelden (het referentiebeeld). Daarmee wordt de relatie tussen beide coördinatensystemen vastgelegd, alsmede de exacte ruimtelijke resolutie bepaald.

De huidige versie van het meetsysteem biedt nochthans niet de mogelijkheid tot automatische coordinaat-conversie, hetgeen derhalve handmatig dient te gebeuren.

5 Resultaten van de testsituatie

Uit de zeven opgenomen beeldreeksen zijn twee korte deelreeksen geselecteerd voor een volledige analyse. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze analyses beschreven.

5.1 Analyseresultaten eerste deelreeks

De verwerking van de eerste deelreeks is in hoofdstuk 4 gebruikt als illustratie bij de beschrijving van de toegepaste methodiek. Deze opnames zijn gemaakt van een hoogte van ca. 500 m. De ruimtelijke resolutie is ca. 22 cm. De belichting is homogeen binnen elke opname, maar gedurende de reeks lijkt de hoeveelheid licht langzaam iets terug te lopen, waardoor radiometrische correctie (histogram matching) noodzakelijk bleek. Met de in hoofdstuk 4 beschreven ontschrankingsmethode (coarsematch en finematch) konden alle beelden in de reeks met ca. 1 pixel nauwkeurigheid op elkaar gepast worden. Toepassing van de voertuigdetectie-methode op 40 beelden uit de reeks leverde een detectiepercentage op van ca. 98%. Tijdens de detectie worden eveneens de positie en de grootte van elk voertuig geschat. Uit handmatige controle blijkt dat bij ca. 20% voertuigen zijn deze schattingen onnauwkeurig is. Voertuig-tracking, uitgaande van de gedetecteerde voertuigen in het eerste beeld van deze 40, liet zien dat alle voertuigen kunnen worden gevolgd.

Het tracking-algoritme gebruikt momenteel alleen coarsematch. Dit beperkt de nauwkeurigheid van de bepaling van de verplaatsing van een voertuig tussen twee beelden tot ca. 1 pixel (22 cm). Bovendien volgt het algoritme de voertuigen van beeld tot beeld, waardoor de onnauwkeurigheden zich cumulatief door de reeks voortplanten. De uiteindelijke fout kan oplopen maximaal 10 pixels. Door finematching kan deze cumulatieve fout worden gereduceerd tot ongeveer 1 pixel.

5.2 Analyseresultaten tweede deelreeks

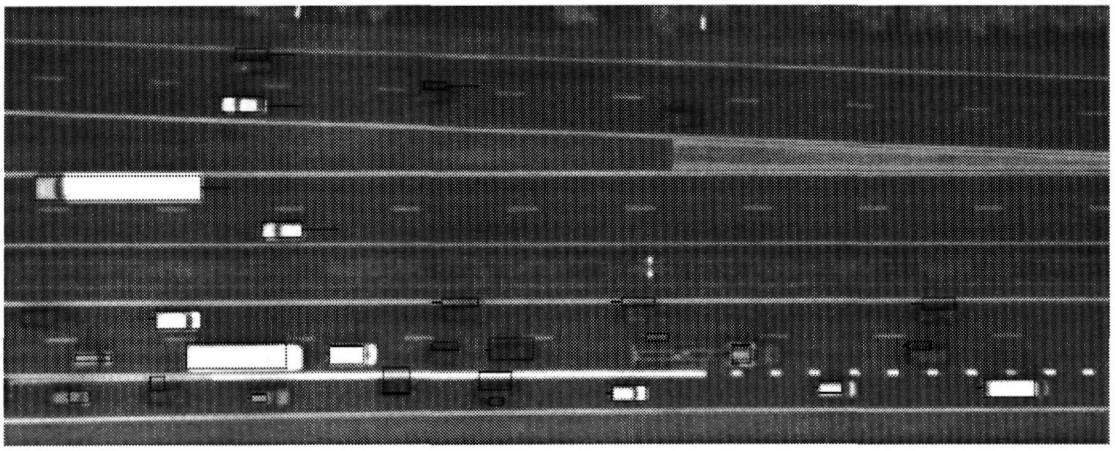
De tweede reeks bestaat uit opnames die gemaakt zijn vanaf 300 m hoogte. De ruimtelijke resolutie bedraagt ca.13 cm. Bij de analyse van deze reeks traden een aantal nieuwe problemen aan het licht. Het opgenomen traject is beduidend korter (1300 x ca.13 cm = ca. 170 m), waardoor het vinden van een voldoende aantal geschikte paspunten (zowel karakteristieke punten als wegdekpunten) zeer moeilijk bleek. Uiteindelijk is het wel gelukt een reeks van 450 opnames te ontschranken, maar de bereikte nauwkeurigheid is bij sommige beelden niet geheel tevredenstellend (ca 1.5 pixel). Het traject dat door al deze 450 opnames bedekt werd had een lengte van ruim 900 pixels (ca. 120 m). Dit gedeelte is als subset geselecteerd.

Op de rijbaan in de onderste helft van het beeld treedt sterke congestie op, waarbij het verkeer soms vrijwel tot stilstand komt. Dit heeft tot gevolg dat zeer lange deelreeksen (van ca. 200 beelden) nodig zijn om het achtergrondbeeld te berekenen. In combinatie met de niet zo nauwkeurige geometrie levert dit onscherpte op in het achtergrondbeeld.

De belichting was gedurende het opnemen van deze reeks meer variabel dan bij de eerste. Niet alleen zijn sommige beelden algeheel lichter dan andere, hetgeen met histogram matching gecompenseerd kan worden, maar ook binnen sommige beelden treden verschillen op in de vorm van lichte vlekken (en donkere schaduwen) op plaatsen waar de zon door de wolken schijnt. Hierdoor ontstaan op deze plaatsen verschillen tussen een individueel beeld en het achtergrondbeeld, hetgeen tot onterechte detecties leidt. Dit kan weliswaar ondervangen worden door de drempelwaardes (voor de beslissing wel/geen voertuig) aan te passen, maar dat gaat ten koste van het detectiepercentage. Een bijkomend probleem van de "betere" ruimtelijke resolutie is dat sommige voertuigen (met name vrachtwagencombinaties) in meerdere delen uiteenvallen.

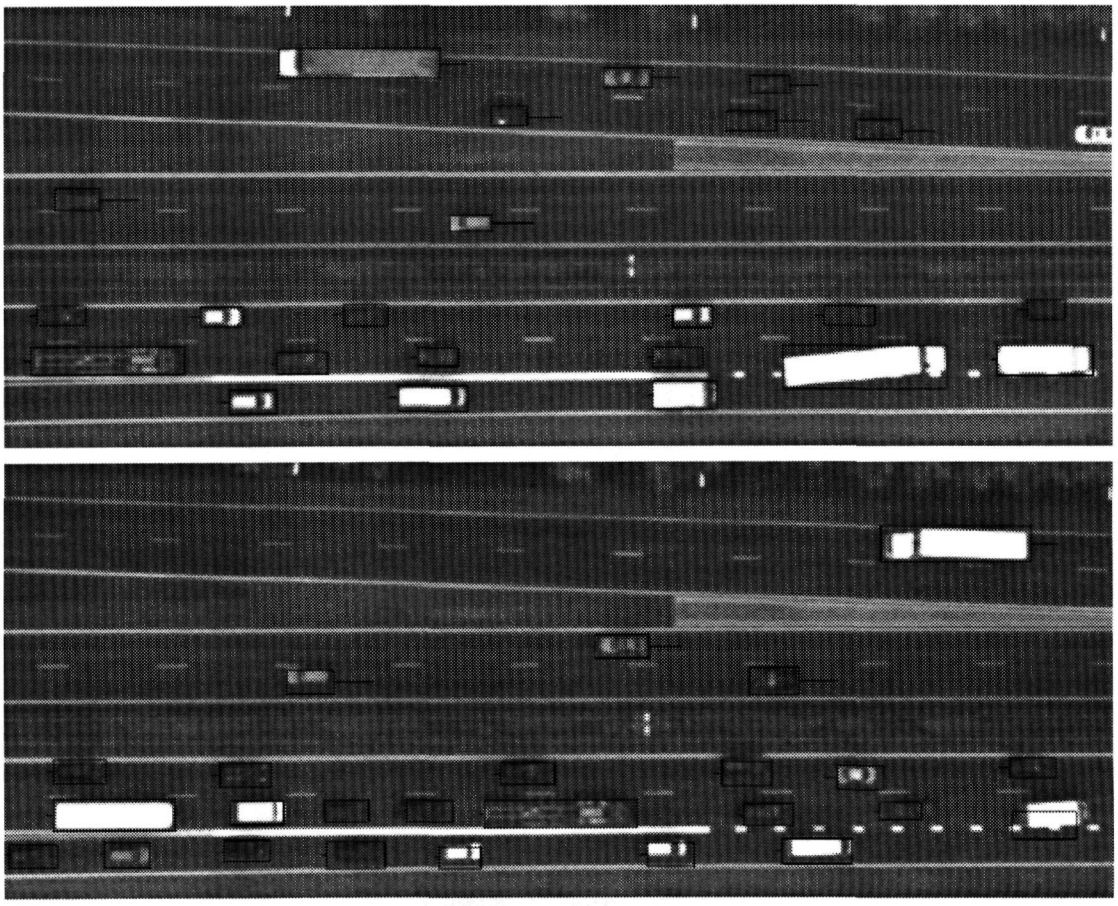
Een lichte verbetering van de resultaten kon bereikt worden door de beelden met een factor 3 te verkleinen naar een ruimtelijke resolutie van ca. 40 cm. Hierdoor worden de

geometrische problemen iets minder nijpend. Het uiteindelijk detectiepercentage in de tweede reeks bedraagt ca. 90%.



Figuur 10 Automatische voertuigdetectie in de tweede beeldreeks

Voor de verdere evaluatie van de tweede reeks zijn de detectie-resultaten daarom handmatig verbeterd. Daarna werden in een reeks van 110 beelden de voertuigen gevolgd. De voornoemde radiometrische problemen leidden ook tot een lichte verslechtering van de tracking-resultaten: van de 45 voertuigen die in deze 110 beelden aanwezig waren werden er twee niet juist gevolgd.



Figuur 11 Voertuig-tracking na handmatige verbetering van de detectie: het eerste en het laatste van een reeks van 110 beelden uit de tweede reeks.

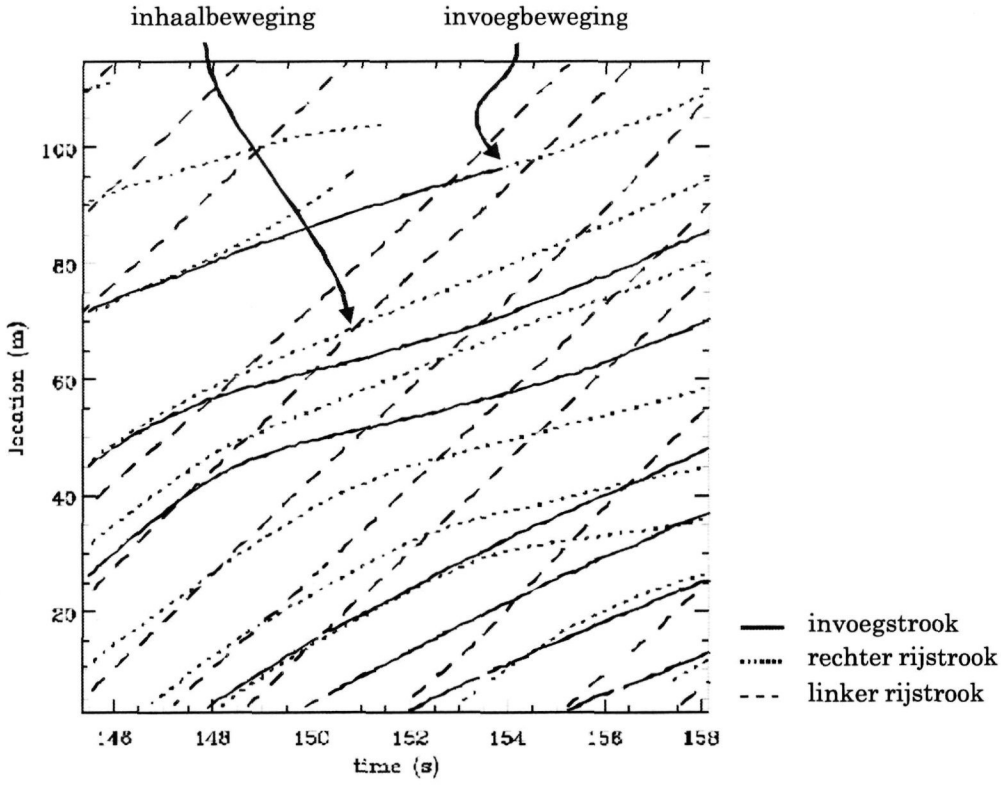
Voor de zeer langzaam rijdende voertuigen, die derhalve over een groot aantal beelden gevolgd moeten worden, leidt de cumulatie van onnauwkeurigheden tot een fout van maximaal ca. 10 pixels (1.3 m) over het hele traject van 120 m.

5.3 Beknopte verkeerskundige analyse

In deze sectie worden kort enkele verkeerskundige karakterstieken beschouwd, met name de trajectoriën, snelheids- en volgtijdsverdeling voor de tweede beeldreeks. Door de beperkingen aan de dataset, met name met betrekking tot de duur van de sequentie en het beschouwde wegvak, is deze analyse illustratief bedoeld om zo een indruk te geven van de beschikbare gegevens. Bovendien geven de resultaten een beeld van de plausibiliteit van de gegevens.

Figuur 12 toont de trajectoriën van de voertuigen op de invoegstrook, de rechter- en linkerrijstrook (strook 0, 1 en 2) voor richting 1 (van links naar rechts). Gedurende de meetperiode was duidelijk sprake van congestie, zoals uit de snelheden, volgtijden en volgafstanden kan worden geconcludeerd.

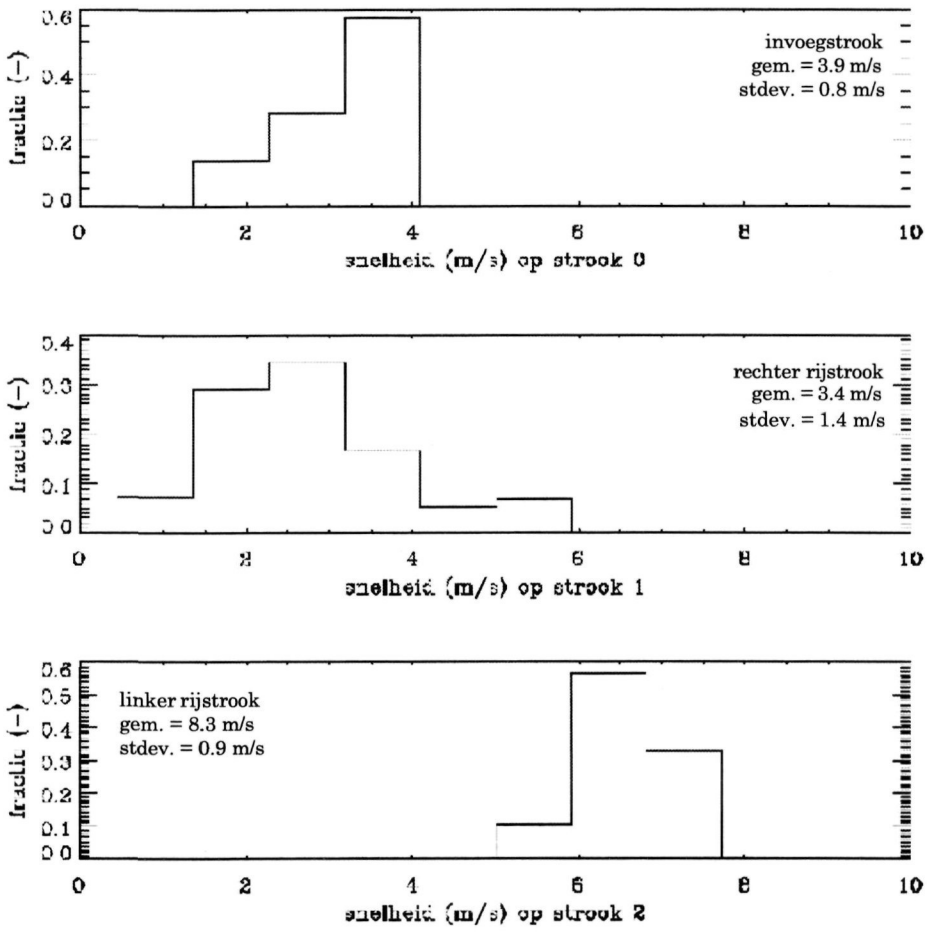
De figuur toont o.a. een rijstrookwisseling van een invoegend voertuig en meerdere inhaalbewegingen. In beginsel kan uit de figuur (en de beschikbare informatie aangaande voertuiglengte) bepaald worden hoe groot het hiaat is dat de invoeger accepteerd. De figuur laat eveneens duidelijk zien dat de snelheden van de voertuigen op de linker rijstrook hoger liggen dan op de rechter- en de invoegstrook.



Figuur 12 Trajectoriën voor beeldreeks 2 (verkeer rijdt van links naar rechts) voor voertuigen op invoegstrook, rechter- en linkerstrook.

De trajectoriën geven geen aanleiding om aan de meetgegevens te twijfelen; opgemerkt dient te worden dat niet alle trajectoriën compleet zijn *en* dat de trajectoriën in de tegenovergestelde rijrichting (zie Figuur 16) enkele onderbrekingen bevatten.

Figuur 13 toont de snelheidsverdelingen op de verschillende rijstroken[1]. In overeenstemming met de trajectoriën laat de figuur zien dat de gemiddelde snelheden op de invoeg (3.9 m/s) en de rechter rijstrook (3.4 m/s) beduidend lager zijn dan op de linkerstrook (8.3 m/s). Toepassen van een Wilcoxon rank test laat zien dat deze verschillen ook significant zijn. Hierbij dient wel opgemerkt dat er geen rekening is gehouden met de sterke correlatie in de meetpunten: veel van de punten zijn immers afkomstig van hetzelfde voertuig. Ter illustratie: voor de rechter rijstrook zijn de 708 datapunten afkomstig van slechts 10 voertuigen.



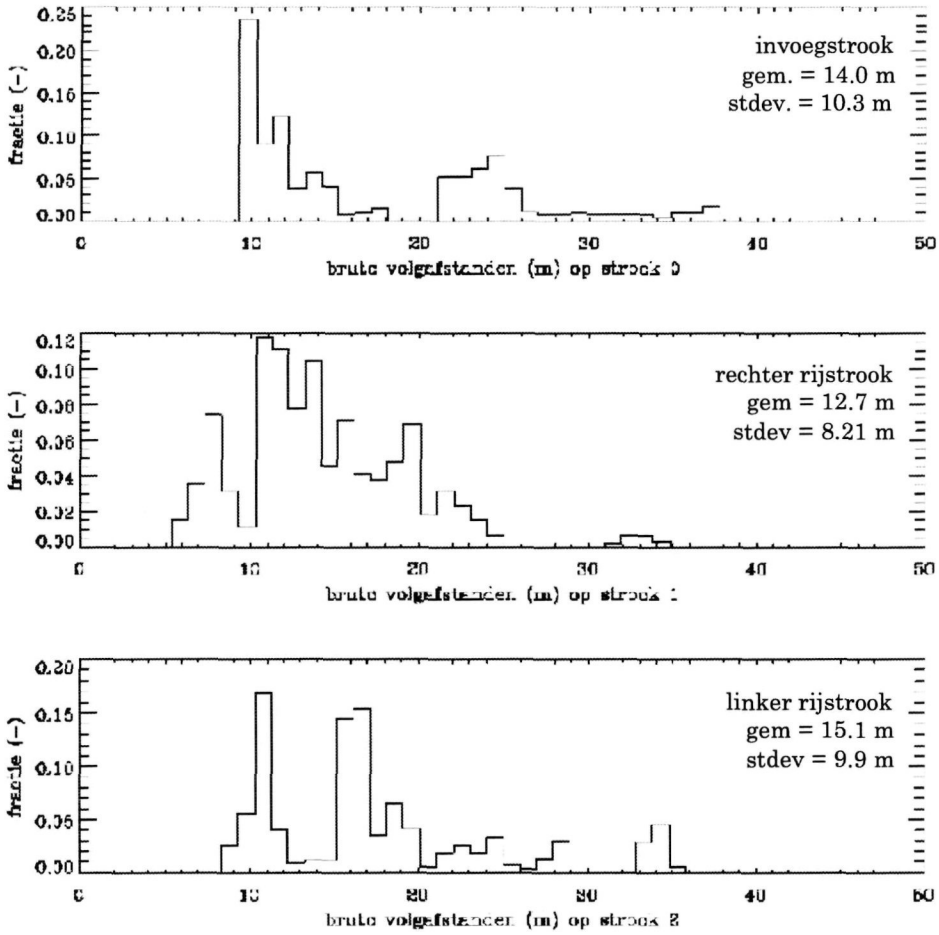
Figuur 13 Snelheidsverdeling voor beeldreeks 2 (verkeer rijdt van links naar rechts) voor voertuigen op invoegstrook (7 voertuigen), rechterstrook (10 voertuigen) en linkerrijstrook (10 voertuigen).

Uit de trajectoriën kunnen, behalve de eerder genoemde snelheden, op eenvoudige wijze alle belangrijke voertuig- en verkeerskenmerken worden afgeleid: bijvoorbeeld volgtijden, volgafstanden, intensiteiten en dichtheden. Ter illustratie toont Figuur 14 de bruto volgafstanden (inclusief voertuiglengte) voor richting 1 van de tweede beeldreeks.

Uit de figuur kunnen we opmaken dat voor deze beeldreeks, de gemiddelde volgafstanden (en de standaardeviaties) op de invoeg- en rechterrstrook kleiner zijn dan op de

[1] De posities van de voertuigen worden op 1 pixel = 0,13 m nauwkeurig bepaald. De tijdresolutie is 0,12 s. De snelheden kunnen derhalve in stappen van ongeveer 1 m/s worden bepaald, zoals duidelijk uit de snelheidsverdelingen worden opgemaakt.

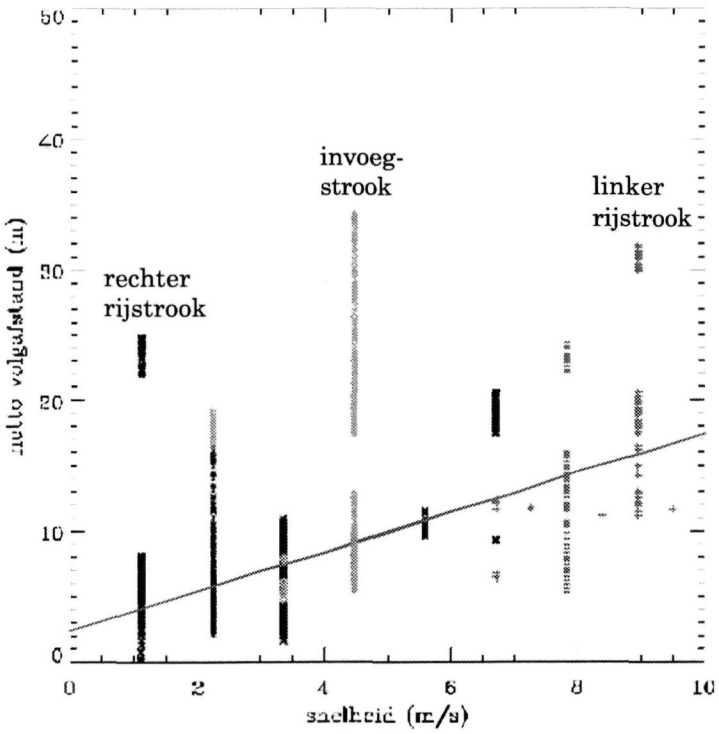
linkerstrook. De lagere snelheden op de invoeg en de rechterstrook zijn hier waarschijnlijk de reden toe: hoe hoger de snelheid, hoe groter de afstand bestuurders bewaren tot hun voorganger.



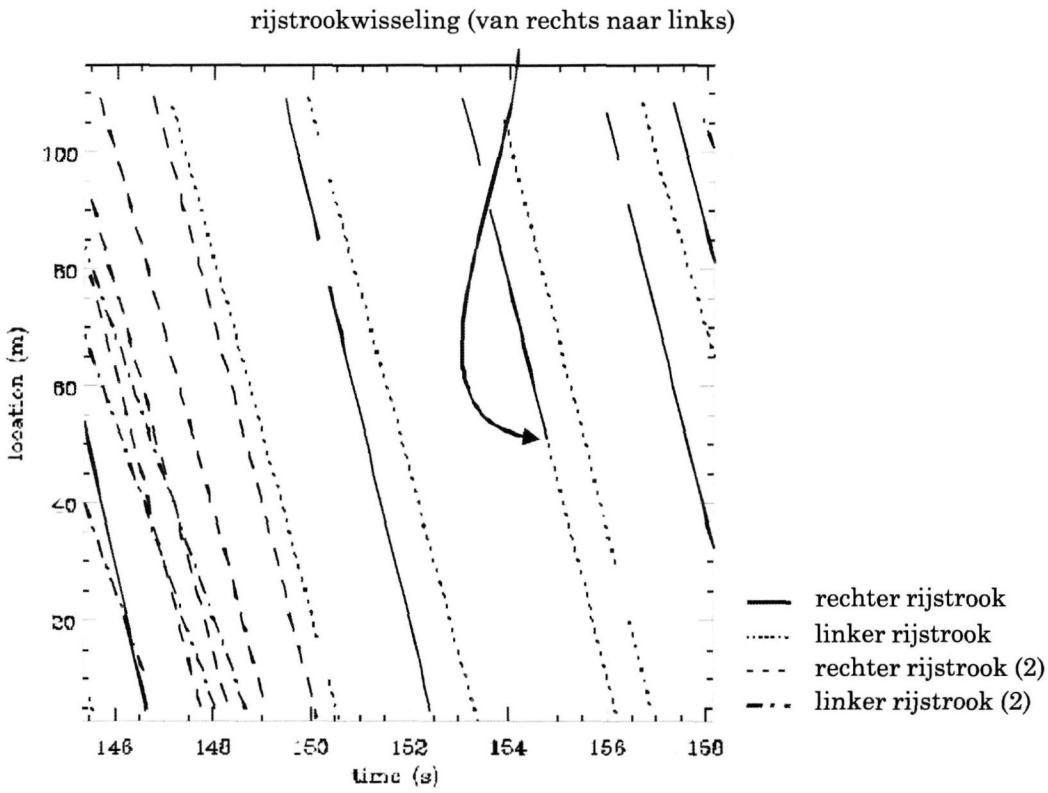
Figuur 14 Volgafstandverdeling op de verschillende rijstroken voor richting 1 in beeldreeks 2.

Figuur 15 toont de (statische) relatie tussen de snelheid van de voertuigen en de *netto volgafstand* voor de verschillende rijstroken. De figuur laat duidelijk zien dat de netto volgafstand toeneemt bij toenemende snelheden, conform de theorie. De figuur toont een aantal clusters, die feitelijk de verschillende waarnemingen afkomstig van één enkel voertuig gedurende de tijd weergeven.

Voor rijrichting 2 (van rechts naar links) kunnen vergelijkbare analyses worden uitgevoerd. Zo toont Figuur 16 de trajectoriën van de verschillende voertuigen voor rijrichting 2. In deze richting is duidelijk geen sprake van congestie, zoals ook uit de snelheidsverdelingen voor de verschillende richtingen duidelijk wordt (zie Figuur 17). De figuur laat ook een aantal 'gaten' in de trajectoriën zien; in praktische situaties kunnen dergelijke gaten eenvoudig worden gecorrigeerd. De trajectoriën geven geen aanleiding aan te nemen dat de verzamelde gegevens incorrect zijn.

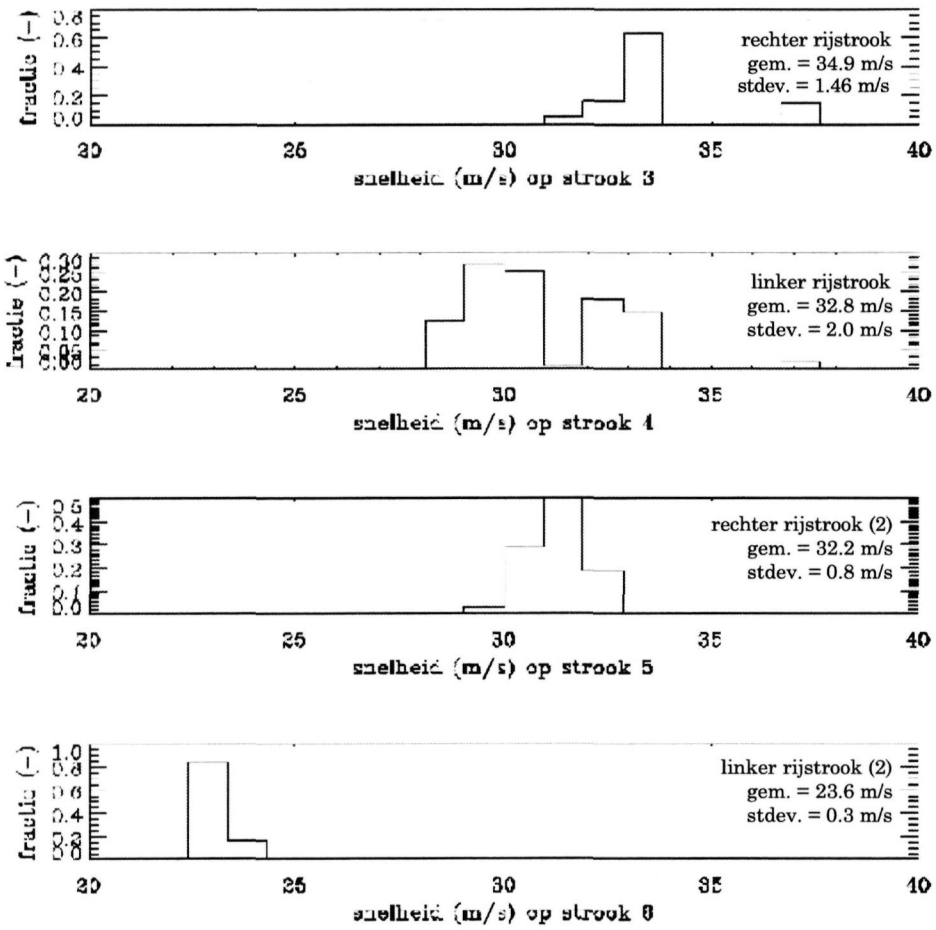


Figuur 15 Relatie netto volgafstand en snelheid gemeten op verschillende rijstroken voor invoegstrook, rechter- en linkerrijstrook (afkomstig van respectievelijk 7, 10 en 10 voertuigen) en lineare regressielijn ($s = s_0 + vT_r$; zie (Helbing,1997).



Figuur 16 Trajectoriën voor rijrichting 2 (van rechts naar links) voor de respectievelijke rijstroken.

Figuur 17 geeft de snelheidsverdeling op de vier rijstroken in de tweede rijrichting. Evenals bij de eerste rijrichting dient opgemerkt dat de verschillende waarnemingen van slechts een klein aantal voertuigen afkomstig is.



Figuur 17 Snelheidsverdeling voor rijrichting 2.

Uit de zeer beperke verkeerskundige analyse van de gegevens kunnen door de kleinschaligheid geen harde conclusies worden getrokken. Er is echter geen reden aan de kwaliteit van de gegevens te twijfelen.

5.4 Aanbevelingen naar aanleiding van de testsituaties

Gezien de bereikte resultaten met de gegeven opnamekwaliteit kan de ontwikkelde methodiek zonder meer levensvatbaar genoemd worden. De belangrijkste problemen zijn ontstaan gedurende de opnamen, tengevolge van wind, bewolking en heiigheid. Bij een eventueel vervolgtraject is het daarom van cruciaal belang dat een tijdstip met goede weersomstandigheden wordt gekozen. De aanvankelijk verwachting dat een bedekte hemel gunstig zou zijn in verband met het ontbreken van scherpe slagschaduwen, is in deze studie weersproken. De problemen die uit de bewolking voortvloeien zijn niet geheel overkomelijk gebleken. Weerscondities met wisselende bewolking met matige tot krachtige wind geven vaak een helder zicht. Schaduwen, anderzijds, zijn met enige voorkennis goed te modelleren, hoewel nader onderzoek hiertoe vereist is.

Andere verbeteringen in het op te nemen materiaal kunnen gevonden worden in toepassing van een lens met de juiste brandpuntsafstand, zodat het oorspronkelijk beoogde opnametraject van 500 m lengte (met de gegeven beeldresolutie) ook inderdaad gerealiseerd wordt. De hogere resoluties van de nu gebruikte opnames bleken geen voordelen te bieden.

Ook dient onderzocht te worden of een gestabiliseerd opnameplatform gerealiseerd kan worden, in combinatie met een opnametijdstip tijdens minder winderige weersomstandigheden. Dit vereenvoudigt de geometrische bewerkingsstappen (hoewel deze uiteindelijk wel geslaagd zijn) en voorkomt verliezen in de lengte van het te analyseren traject, met name bij lange beeldreeksen.

Voor een verbetering van de analysemethode dient in eerste instantie gedacht te worden aan een integratie van de detectie- en tracking-stappen. Niet alleen is dit nodig om "nieuwe" voertuigen die het onderzochte traject binnenrijden ook te kunnen behandelen, maar tevens kunnen dan "gemiste" voertuigen die in een latere opname wel worden gedetecteerd, terug-getrackt worden. Uiteraard dient het tracking-algoritme met finematch uitgebreid te worden.

6 Conclusies

Dit document beschrijft de belangrijkste stappen in de ontwikkeling van een nieuw meetsysteem voor het bepalen van voertuigtrajectoriën, waarbij is gekozen voor het maken van luchtopnames vanuit een helikopter met behulp van een digitale camera.

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is door middel van de voorgestelde methode de gewenste verkeersdata in te winnen. De methode biedt derhalve goede perspectieven voor de dataverzameling ten behoeve van het onderzoek verkeersafwikkeling in congestie. In beginsel beperkt de toepassing van de methode zich echter niet tot een puur wetenschappelijke onderzoeksdoel. Ook bij ex-post evaluatiestudies waarbij het verzamelen van verkeersgegevens een grote rol speelt kan de methode worden ingezet om op vrij goedkope wijze en zonder het verkeer te hinderen zeer gedetailleerde gegevens te verzamelen. Bovendien is het mogelijk niet alleen het volggedrag van de voertuigen op de afzonderlijke rijstroken te bestuderen, maar ook het laterale gedrag. Zo kan bijvoorbeeld het gedrag van automobilisten i.g.v. dynamische dwarsprofielen (versmalde rijstroken) worden onderzocht. Tot voorkort waren hiertoe alleen voertuiggegevens voor handen die zijn verzameld op een doorsnede en met name betrekking hebben op het longitudinale karakteristieken (volgtijd, bezettingsgraad). De verzamelde gegevens maken het mogelijk het laterale gedrag te onderzoeken (positie op rijstrook, strookwisselingen, etc.). Bovendien kunnen niet alleen lokale karakteristieken van de voertuigstroom worden bepaald; ook is het mogelijk om direct uit de gegevens *momentane karakteristieken* af te leiden (dichtheid, momentane snelheid).

6.1 Conclusies met betrekking tot onderzoeksvragen

De fototechnische bewerkingen die nodig zijn om uit de digitale opnames te komen tot voertuigtrajectoriën zijn eigenlijk zonder grote problemen automatisch softwarematig uitgevoerd. Dat hield in:

- Opheffing van vertekening.
- Ontschranken (opheffen van perspectievische vertekening).
- Georeferencing door het gebruik van paspunten.
- Correctie voor veranderinde lichtomstandigheden.
- Detectie en tracking van voertuigen (tracking alleen via coarse-matching, i.e. op één pixel nauwkeurig).

De vragen die met dit onderzoek beantwoorden moeten worden zijn in de probleemstelling (zie hoofdstuk 2) gegeven. Daarbij zijn de volgende resultaten gevonden:

1. De lengte van het te onderzoek traject; daarvoor is bij dit onderzoek een lengte van 210 m gevonden ten gevolge van een misrekening in de effectieve breedte van de camerasensor en van verlies bij de nabewerking (bewegende beelden waardoor van de oorspronkelijke 280 m er 210 m overbleven), bij een vlieghoogte van 500 m. Bij een vlieghoogte van 300 m reduceert de lengte van het waargenomen wegvak tot 120 m.
2. Het aantal waar te nemen voertuigen; daar is vrijwel geen limiet voor gevonden afgezien van de fysieke limiet van de maximale voertuigdichtheid
3. De duur van de opname; daarvoor is, door een aantal problemen bij de opnames, nog geen duidelijk antwoord voor gevonden. De stabiliteit van de helikopter laat te wensen over en het softwarematig bewerking van de beelden compenseert die beweging wel, maar beperkt daarmee wel het gebied dat in opeenvolgende beelden bewaakt kan worden. De lengtes van de twee geanalyseerde beeldreeksen betrof respectievelijk 45 s (lichte congestie) en 52 s (zware congestie).
4. Het percentage gedetecteerde / getrackte voertuigen in de eerste sequentie (licht congestieve afwikkeling) ligt rond de 98%; het aantal gedetecteerde / getrackte voertuigen in de tweede sequentie (zware congestie) ligt rond de 93%. De oorzaak van de minder goede resultaten in de tweede sequentie is met name gelegen in de slechtere omstandigheden en is niet te wijten aan de verkeerskarakteristieken. Er is geen aanleiding aan te nemen dat detectie en tracking worden bemoeilijkt door de

optredende congestie. Met andere woorden, ondanks de kleine afstanden tussen de voertuigen (tussen de 2 m en 4 m) is het mogelijk de voertuigen te onderscheiden.

5. De nauwkeurigheid waarmee de positie en snelheid van ieder voertuig bepaald kan worden; de gestelde eisen van 50 cm nauwkeurigheid van plaatsbepaling kan gehaald worden. Voor detectie bedraagt de nauwkeurigheid één pixel, hetgeen voor de geanalyseerde beeldreeksen neerkomt op een ruimtelijke resolutie van 22 cm (van 500 m hoogte) en 13 cm (van 300 m hoogte). Tracking van de gedetecteerde voertuigen gebeurt ook op één pixel nauwkeurig. De fouten die bij de gebruikte trackingsmethode worden gemaakt zijn echter wel cumulatief; dit kan eventueel worden verholpen door finematching dan wel het integreren van detectie en tracking.
6. De opname frequentie van 10 Hz blijkt met de gebruikte apparatuur niet haalbaar, maar 8.6 Hz was wel mogelijk.

6.2 Leerpunten

Uit het onderzoek zijn een belangrijke aantal leerpunten naar voren gekomen. Allereerst is de gebruikte camera met framegrabber niet optimaal voor het gestelde doel. De opnamesnelheid en de mogelijkheden om meerdere beeldreeksen te bewaren voldeden niet aan de gestelde *technische eisen*: slechts 8.6 fps tegenover de gewenste 10 fps en slechts de mogelijkheid om één beeldreeks op te slaan. Dit laatste maakt het onmogelijk de opname tijdelijk te stoppen (bijvoorbeeld indien naar een volgende locatie wordt gevlogen). Ook de slechte beheersbaarheid van de installatie tijdens de opnames maken het noodzakelijk dat er aanpassingen worden aangebracht aan het waarnemings- en registratiesysteem.

De stabiliteit van de helikopter is lager dan gewenst. Om onnodig beeldverlies te voorkomen en om het mogelijk te maken langere beeldsequenties in te winnen is het gebruik van gyroscopische stabilisatie wenselijk. Daarbij zou de beschikking over een roterend camerasysteem het mogelijk maken de helikopter met de neus in de wind te manoevreren terwijl de weg op correcte wijze wordt waargenomen. Dientengevolge zou de stabiliteit van de helikopter worden verhoogd. Ook het integreren van de cameraopstelling met een GPS kan een aantal software bewerkingen achteraf vereenvoudigen.

7 Onderzoeksopzet vervolgtraject

In dit hoofdstuk beschrijven we de onderzoeksopzet voor het vervolgtraject. Hierbij is uitgegaan van een tweetal fasen, namelijk:

1. Vervolgonderzoek ontwikkeling meetsysteem.
    a. Tweede helikoptervlucht
    b. Definitieve keuze algoritme en verdere ontwikkeling tracking software
    c. Gebruik kleurenbeelden; integratie beeldreeksen verschillende camera's; integratie databronnen
    d. Post-processing data
    e. Data-analyse en validatie meetsysteem
2. Verzamelen dataset ten behoeve van de studie verkeersafwikkeling bij congestie
    a. Softwarematige aanpassing voor meevliegen verkeersstroom

7.1 Tweede fase ontwikkeling nieuw meetsysteem

In deze studie zijn de eerste stappen gezet naar het ontwikkelen van een nieuw meetsysteem voor het inwinnen van dynamsiche individuele voertuigdata. Op basis van het beschikbare beeldmateriaal, dat door zowel de weersomstandigheden als door de gebruikte lens niet van goede kwaliteit was, bleek het niet mogelijk tot een voertuigdetectie te komen van een voldoende kwaliteit. Als gevolg hiervan wordt het niet zinvol geacht verder te experimenteren met het huidige opnamemateriaal.

7.1.1 Tweede helikoptervlucht

Het verdient derhalve de aanbeveling om een tweede helikoptervlucht uit te voeren onder gunstigere omstandigheden, namelijk:

- *Gunstige weerscondities.* Bij twijfelachtige weercondities (mist, heiigheid, te weinig wind, etc.) dient de vlucht te worden uitgesteld. Hierbij dienen we wel op te merken dat de nadelige invloed van de weerscondities op de waarnemingen het toepasbaarheid van de waarnemingsmethode beperkt. Zo kan het huidige meetsysteem niet worden ingezet voor het bestuderen van het effect van regen of mist op het congestierijgedrag. Wellicht is dat met infraroodopnames wel mogelijk.
- *Goede combinatie lens / lichtgevoelige chip.* Door het gebruik van een lens met een grotere openingshoek kan een beduidend groter deel van het terrein worden waargenomen (500 m i.p.v. 280 m). Als gevolg van de schommelingen van het ingewonnen beeld zal het deel van het terrein dat gedurende de gehele sequentie in beeld daarom aanzienlijk groter zijn. Het alternatief is het gebruik van een beeldchip met een groter lichtgevoelig oppervlak.
- *Gebruik gyroscopische mounting camera.* Ofschoon het gebruik van een gyroscopische mounting niet noodzakelijk is voor het toepassen van de hier ontwikkelde methode, verdient het de aanbeveling in het vervolg toch van een dergelijke mounting gebruik te maken. De reden hiertoe is wederom het vergroten van het effectieve waargenomen terrein in een bepaalde beeldsequentie. Hiermee kan het verlies van 70 m waargenomen terrein worden gereduceerd en wordt het mogelijk langere beeldsequenties te verzamelen (meer dan 45 s).
- *Tweede camera voor meekijken.* We verwachten dat het gebruik van een tweede camera, waarmee de piloot beter in staat is zijn positie te bepalen en te behouden, tot een stabieler beeld zal leiden.
- *Integreren van de cameraopstelling met een GPS.* Dit kan een aantal software bewerkingen achteraf sterk vereenvoudigen.

Op grond van de reeds behaalde resultaten, verwachten we dat de voertuigdetectie nagenoeg 100% zal zijn. Daarbij zal het mogelijk zijn het definitieve algoritme vast te stellen. Bovendien kunnen langere beeldsequenties worden ingewonnen en is het gedeelte van het terrein dat gedurende de gehele sequentie waargenomen wordt beduidend groter.

7.1.2 Verdere ontwikkeling software

De in het project ontwikkelde software bevat nog niet alle functionaliteit die nodig is voor de praktische toepassing ervan. De volgende functies worden in het vervolgtraject ontwikkeld:

- Definitieve keuze detectiemethode
- Toevoeging finematch aan trackingsoftware
- Conversie coördinaten (beeldcoördinaten naar terrestrisch coördinatensysteem)
- Ingegratie detectie- en trackingfuncties

Definitieve keuze detectiemethode
Door de matige kwaliteit van de opnames bleek een definitieve keuze van het detectie-algoritme niet mogelijk. Indien er betere opnames beschikbaar zijn, kan deze keuze echter wel gemaakt worden. Op grond van de reeds bereikte resultaten mag dan een detectiegraad verwacht worden die zeer dicht tegen de 100% ligt.

Finematching trackingsoftware
In het onderzoek is slechts in geringe mate aandacht besteed aan de tracking – *het volgen van de in de vorige stap gedetecteerde voertuigen door de beeldreeks* – mede door de onvoldoende beeldkwaliteit en de hieruit volgende extra inspanningen nodig voor detectie. In de huidige software is het coarsematch-gedeelte geïmplementeerd. Dit geeft goede resultaten: alle voertuigen in de onderzochte reeks worden gevolgd en de posities zijn voldoende nauwkeurig bepaald om tot finematch over te kunnen gaan. Ter voltooiing van het algoritme dient, zoals gezegd, finematch toegevoegd te worden. Ook dient aandacht besteed te worden aan de verwarring die zou kunnen ontstaan als twee dezelfde voertuigen dicht bij elkaar rijden.

Conversie beeldcoördinaten
Tot nu toe vonden alle berekening plaats in beeldcoördinaten. Voor de conversie naar een terrestrisch coördinatensysteem is een geocoding nodig van de beelden (het referentiebeeld). Daarmee wordt de relatie tussen beide coördinatensystemen vastgelegd, alsmede de exacte ruimtelijke resolutie bepaald. Omdat dit een enigszins tijdrovende standaardprocedure is, is er nog niet veel aandacht aan geschonken. De conversie zoals die is gebruikt voor het bepalen van de voertuigtrajectoriën in sectie 5.3 kan worden bewerkstelligd door de rij- en kolomcoordinaten te vermenigvuldigen met een schaalfactor (in dit geval, 0,12 m), hetgeen de x en y coordinaten oplevert; door het beeldnummer te delen door het aantal fps (8.6) kunnen de tijdstippen worden bepaald. In het vervolgonderzoek zal een automatische functie kunnen worden toegevoegd.

Integratie detectie- en trackingfuncies.
Tenslotte zou in de volgende versie van de software de integratie van detectie en tracking wenselijk zijn. In de huidige versie van de software worden de detectiegegevens niet expliciet bij de tracking gebruikt: wanneer een voertuig is gedetecteerd, wordt een techniek vergelijkbaar met het ontschranken toegepast om het voertuig door de beeldreeks te volgen. Eventuele detecties van het voertuig later in de beeldreeks worden niet expliciet gebruikt.

7.1.3 Gebruik kleurbeeldmateriaal; integratie beeldreeksen verschillende camera's; integratie databronnen

Gegeven de resultaten van het onderzoek wordt verwacht dat onder de juiste omstandigheden vrijwel alle voertuigen kunnen worden gedetecteerd. Tijdens het onderzoek is echter wel gebleken dat het detecteren en volgen van voertuigen waarvan de kleurintensiteit (gemiddelde waarde rood-, groen- en blauwintensiteit) overeenkomt met de intensiteit van het asfalt soms problematisch is. Om dergelijke problemen te verhelpen kan het *gebruik van kleurenbeeldmateriaal* worden overwogen, waarmee het mogelijk wordt die voertuigen te detecteren waarvan de kleurintensiteit weliswaar gelijk is aan

die van het asfalt, maar waarvan de kleur (intensiteit per rood, groen en blauw) verschilt. Voertuigen met dezelfde kleur als het asfalt kunnen echter nog steeds problemen opleveren.

Verwacht wordt dat, gebruikmakend van de juiste meetopstellen en onder de juist omstandigheden, de vereiste lengte van het waargenomen wegvak (500 m) kan worden gehaald. Omdat voor het beantwoorden van een aantal onderzoekvragen een langer traject gewenst is, dient onderzocht te worden wat hiertoe de mogelijkheden zijn.

Een voor de hand liggende methode is het integreren van beeldreeksen van twee of meer camera's die al dan niet aan dezelfde helikopter zijn bevestigd. In beginsel kan de integratie op twee manieren: door de beelden letterlijk te integreren tot één beeld (na ontschranken), of door op beide reeksen de ontwikkelde software toe te passen en pas na detectie en tracking de trajectoriën te integreren.

Een ander punt is de detectie van voertuigen die door hun kleur niet of nauwelijks van het wegdek zijn te onderscheiden. In sommige gevallen kunnen problemen worden verholpen door gebruik te maken van kleurenbeelden (met name in de toekomst, indien camerasystemen die met hoge resolutie kunnen omgaan beschikbaar komen). Vooralsnog wordt niet verwacht dat het gebruik van kleur alle problemen zal wegnemen. Het verdient derhalve de aanbevelingen de toepassingsmogelijkheden van andere parallele systemen te onderzoeken. Een belangrijke mogelijkheid is het gebruik van infraroodcamera's of radar. Problemen met slecht zicht door luchtvochtigheid kunnen daarmee worden opgevangen. Tevens kunnen voertuigen worden gedetecteerd die slecht zichtbaar zijn in opnames met zichtbaar licht. Deze systemen bieden weliswaar niet alle informatie die noodzakelijk is voor de hier beschreven vorm van gegevensverzameling (zoals voertuiglengte en breedte); ze bieden echter wel extra informatie tijdens de detectie en tracking van de voertuigen.

7.1.4 Post-processing data

Op grond van de vastgestelde nauwkeurigheid van het meetsysteem kan worden besloten of het toepassen van wiskundige technieken voor het corrigeren van de gegevens mogelijk en wenselijk is. Hierbij gaan de gedachten bijvoorbeeld uit naar toepassingen van Kalman filters, waarbij de trajectoriën van de voertuigen worden gecorrigeerd op grond van eenvoudige kinematische vergelijkingen waaraan de trajectoriën zouden moeten voldoen. Binnen vergelijkbaar onderzoek zijn reeds goede resultaten behaald met een dergelijke aanpak (Hoogendoorn en Daamen,2003).

7.1.5 Uitgebreide data analyse en validatie meetsysteem

Een essentiele stap in de ontwikkeling van een nieuw meetsysteem is de validatie van het systeem. Een eerste stap is het visualiseren van de gegevens (volgtijdverdelingen, vlekkenkaarten, tijd-weg diagrammen, etc.). Buiten een plausibiliteitscheck geeft een dergelijke analyse ook een goed, eerste inzicht in de verzamelde data.

Het valideren van het ontwikkelde meetsysteem kan op een aantal manieren gebeuren. Onderstaande beschrijft een aantal mogelijke aanpakken:

- Gebruik geijkt meetvoertuig: door een geinstrumenteerd voertuig te laten meerijden met de waargenomen voertuigstroom kan betrouwbare en gedetailleerde microscopische gegevens worden verzameld. Deze gegevens behelzen zowel locatie en snelheden van de probe zelf, als de locaties en snelheden van de voertuigen die binnen de detectierange van het geinstrumenteerde voertuig rijden.
- Gebruik van inductielussen (MONICA / MARE data). De eenvoudigste en goedkoopste manier het systeem te valideren is het vergelijken van de resultaten van het ontwikkelde systeem met 1-minuut of 5-minuut gegevens. Een dergelijke vergelijking doet een indicatieve uitspraak over de kwaliteit van het meetsysteem (aantal gedetecteerde voertuigen en gemiddelde snelheid). Een nadeel is echter dat op voertuigniveau niets over de validiteit van het meetsysteem kan worden gezegd.

- Gebruik RESI / pneumatische slangen. Genoemde systemen verzamelen individuele voertuiggegevens op een doorsnede en zijn daarmee bijzonder geschikt voor de validatie van het meetsysteem. De pneumatische slangen van het Laboratium voor Verkeerskunde (LvV) zijn daarbij bijzonder nauwkeurig.

7.2 Onderzoek rijgedrag bij congestie

Voor het vergaren van kennis over het rijgedrag van bestuurders tijdens congestie is het verzamelen van gedetailleerde en betrouwbare verkeersgegevens noodzakelijk. In beginsel zijn – zoals boven vermeld – de uit de beelden gewonnen gegevens geschikt om de verschillende onderzoeksvragen binnen dit project te beantwoorden (metingen elke 0,5 s, positie voertuig in 0,5 m), vermits aan de gestelde eisen met betrekking tot meetopstelling wordt voldaan. Het beschouwen van de invloed van exogene condities (zoals weer) is slechts in beperkte mate mogelijk, door de aanzienlijke invloed van bijvoorbeeld het weer op de toepasbaarheid van de methode.

De beelden die tijdens onderhavige studie zijn verzameld bevatten congestieve afwikkeling, maar worden door de korte duur van de sequenties (respectievelijk 45 s en 52 s) en de geringe kwaliteit van de gegevens (als gevolg van slecht weer, lens, etc.) niet geschikt bevonden voor de beantwoorden van de onderzoeksvragen binnen het onderzoek rijgedrag bij congestie. Daarbij zijn de waargenomen wegvakken te kort (210 m en 120 m).

Het verdient derhalve de aanbeveling om ten behoeve van dit onderzoek één of meerdere vluchten te plannen. Gedurende deze vluchten worden voor verschillende situaties gegevens verzameld. Deze situaties worden gekenmerkt door het type discontinuïteit (weefvak, toerit, afrit, geen discontinuïteit), de geometrie van de discontinuïteit (lengte in- en uitvoegstrook), de verkeersvraag (vraag op toerit, op afrit, etc.), samenstelling van het verkeer, etc. Ook wordt op verschillende locaties in de file gemeten (de kop, de staart, en in de file). De duur van een meting is afhankelijk van de gewenste statische significantie van de resultaten (zeg, 95%) en de variabiliteit van de gegevens (fluctuaties in voertuigvolggedrag, inhaalkansen, etc.). Om over laatste een uitspraak te kunnen doen, dienen de gegevens uit de pilot nader te worden bestudeerd. Gezien de grote hoeveelheid gegevens die uit een beeldsequentie van 15 minuten kan worden gewonnen, is het echter niet waarschijnlijk dat een waarnemingsperiode van meer dan 30 minuten per situatie noodzakelijk is.

Het lijkt voor de hand te liggen in eerste instantie naar een eenvoudige bottleneck situatie te kijken, bijvoorbeeld een afvallende rijstrook of een enkele toerit.

De verzamelde gegevens zijn zowel geschikt voor theorievorming als voor modelkalibratie. In beide gevallen kan gekeken worden naar zowel de longitudinale processen en laterale processen.

De ontwikkelde methode heeft zich toegespitst op een 'gefixeerde waarneemlocatie'. Binnen het onderzoek rijgedrag bij congestie is de wens geuit ook met het verkeer mee te vliegen. Dit is met de huidige software echter niet zondermeer mogelijk en softwarematige aanpassingen zijn derhalve noodzakelijk.

Een andere mogelijkheid om een langer traject waar te nemen is gebruik van meervoudige waarnemingslocaties. Hiertoe kan een helikopter uitgerust worden met meerdere camera's, of kunnen meerdere helikopters met meerdere camera's worden ingezet. In het eerste geval ontstaat het probleem dat de waarnemingshoek te groot wordt, met nadelige gevolgen voor de nauwkeurigheid van de detectie en de tracking. Bij de inzet van meerdere helikopters dienen de waarnemingen te worden gekoppeld.

Bovendien is de kans aanwezig dat het verkeer beinvloed wordt wanneer er meer dan één helikopter boven de weg hangt.

7.3 Overzicht aanpassingen software, beoogde resultaten en haalbaarheid

Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende softwarematige aanpassingen en de beoogde resulaten van deze aanpassingen. Ook de ontwikkelingstijd (in werkweken) en een indicatie van de haalbaarheid is in de tabel weergegeven.

Toevoeging software	**Beoogd resultaat**	**Ontwikkelingstijd (in werkweken)**	**Haalbaarheid**
Finematching trackingmethode	• Verhogen nauwkeurigheid tracking van 1 pixel naar 0,1 pixel. • Reductie cumulatieve fout tracking tot 1 pixel.	2 weken	Verbetering nauwkeurigheid waarschijnlijk; behaalde nauwkeurigheid mogelijk minder dan 0,1 pixel (b.v. 0,25 pixel).
Integratie detectie en tracking	• Reductie cumulatieve fout tracking tot maximaal 3 pixels.	4 weken	Haalbaarheid hoogstwaarschijnlijk
Automatische conversie beeldcoordinaten naar terrische coordinaten	• Wegnemen noodzaak handmatige conversie beeldcoordinaten achteraf.	2 weken	Haalbaarheid hoogstwaarschijnlijk
Gebruik kleurenfoto's	• Verhogen detectiekans voor voertuigen met intensiteit gelijk aan intensteit asfalt. • Verlagen kans of valse detecties (shaduwen). • Mogelijke reductie nauwkeurigheid (trade-off resolutie / kleur).	4 weken	Haalbaarheid waarschijnlijk
Integratie databronnen (m.n. infrarood)	• Verhogen detectiekans voor voertuigen met intensiteit gelijk aan intensteit asfalt. • Verlagen kans op valse detecties (shaduwen)	4 weken	Haalbaarheid redelijk waarschijnlijk
Integratie materiaal meerdere camera's	• Mogelijkheid tot waarnemen langere wegsecties > 500 m	4 weken	Haalbaarheid redelijk waarschijnlijk
Meevliegen verkeersstroom	• Mogelijkheid tot waarnemen langere wegsecties > 500 m	4 weken	Haalbaarheid redelijk waarschijnlijk

Tabel 1 Overzicht softwarematige aanpassingen, beoogde resultaten, benodige tijd en haalbaarheid.

8 Literatuur

Treiterer, J. and J.A. Myers (1974) The hysteresis phenomenon in traffic flow. The 6h International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Reed Pty Ltd, Artamon N.S.W., pp.13 - 38.

Bosch, J. (2000) Het rij- en inhaalgedrag op versmalde rijstroken. Afstudeerscriptie AVV en Technische Universiteit Delft

De Vries, J. (1999) Waarnemingen van verkeersstromen met remote sensing. Afstudeerscriptie Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat en Technische Universiteit Delft

Dijker, T., C.N. Landman en P. van der Vlist (2001) Evaluatie van een Videodetectiesysteem van Vivatraffic. Laboratorium voor Verkeerskunde, Technische Universiteit Delft.

Helbing, D. (1997). Verkehrsdynamik (in Duits). Springer-Verlag.

Hoogendoorn, S.P. and W. Daamen (2003). Extracting Microscopic Pedestrian Characteristics from Video Data. To be submitted to Transportation Research Board Annual Meeting 2003.

Bijlagen

A Beschrijving code en inhoud CD

A.1 Beschrijving code

De software is gebaseerd op een combinatie van twee pakketten:

1. Khoros 2.1, aangevuld met speciale fotogrammetrie-software, te weten de programma's "measure" (voor paspuntselectie), "match" (voor finematching tijdens paspuntoverdracht) "rectify" (ontschraking) en "lens" (lensvertekeningscorrectie). Khoros 2.1 is een public domain pakket; het copyright op de fotogrammetrie-software berust bij de sectie FRS.
2. ILWIS 1.41 aangevuld met "mq" (een image calculator, waarmee ook het achtergrondbeeld berekend kan worden), "rank", "mmin" en "mmax" (morfologische operaties), en "qtseg" (connected component labeling). Deze aanvullingen kunnen ook stand-alone draaien, zodat het ILWIS pakket zelf niet benodigd is. Deze aanvullingen zijn door mij ontwikkeld en kunnen probleemloos worden uitgeleverd.

Bovendien zijn er in het kader van dit pilot-project aanvullende programma's ontwikkeld, waarvan "coarsematch" en "trackmatch" de belangrijkste zijn.

Alle software draait onder Linux op PC computers. Er wordt, in aanvulling op het voorgaande, veelvuldig gebruik genmaakt van standaard software voor display en conversie van digitale beelden ("xv" en ImageMagick), alsmede van shell scripts en awk scripts.

A.2 Inhoud CD

De bij dit rapport behorende CD bevat een viertal archives, namelijk: Khoros, Digphot, Ilwsoft en Scripts.

1. Khoros bevat het volledige standaard khoros-pakket (public domain)
2. Digphot bevat khoros-uitbreidingen die door de sectie FRS vervaardigd zijn, alsmede de daarbij benodigde libraries. Van belang zijn rectify, match en measure; deze staan in de directory genaamd objects/kroutine.
3. Ilwsoft bevat een heleboel software die gebaseerd is op het zogeheten ILWIS 1.41 dataformaat, maar die onafhankelijk gebruikt kan worden. Niet alles hierin wordt in dit project gebruikt, anderzijds zijn sommige modules speciaal bijgemaakt (o.a. coarsematch en trackmatch) of aangepast. Het verschil tussen deze categorieën is op geen enkele wijze merkbaar (ook niet relevant).
4. Scripts bevat shell-scripts waarmee de (vele) stappen in de ontschrankings-, detectie- en tracking-processen enigszins geautomatiseerd kunnen worden.

De software op de CD, in het bijzonder de Digphot software, mag alleen voor toepassingen in het kader van dit project worden gebruikt. De software mag niet zonder toestemming van de Sectie Fotogrammetrie en Remote Sensing worden verspreid.

Bovendien staan op de CD twee powerpoint-presentaties, waarin filmpjes van de beeldreeksen.

B Dataformaat

Het uiteindelijke gegevens beschrijven de locatiegegevens van de geïdentificeerde voertuigen relatief aan de weg. Hierbij is gekozen voor het volgende dataformaat:

- Voor ieder frame k (= tijdstip t) voor ieder geïdentificeerd object (voertuig) de
  - Object_ID (unieke index die het mogelijk maakt objecten terug te vinden in de verschillende frames)
  - x-coördinaat (longitudinale positie van het object «Object_ID» in frame k ten opzichte van een referentiepunt, waarbij wordt aangesloten bij de wegcoördinaten zoals op de wegtekeningen is weergegeven)
  - y-coördinaat (laterale positie van het object «Object_ID» in frame k ten opzichte van een referentiepunt. De markering van de rechterrijstrook wordt hierbij als nulpunt genomen en de as naar links positief wordt gekozen)
  - lengte l en breedte b van de voertuigen voor iedere tijdstap
- Extra informatie per frame:
  - het tijdstip waarop het frame slaat te hebben
  - informatie betreffende de verschillende bewerkingen die op het frame hebben plaatsgevonden te hebben (translatie en rotatie).

C Verslag vlucht

Deze bijlage beschrijft de vlucht dd. 25 april 2002 (zowel omstandigheden als de meetlocaties op de verschillende tijdstippen gedurende de vlucht).

C.1 Omstandigheden tijdens de vlucht

Op de dag van de vlucht, 25 april 2002, leken de weersomstandigheden ongunstig. Vooral het zicht, althans op de grond, was slecht. In Lelystad was de situatie zeer heiig te noemen, soms zelfs ronduit mistig. Toen de piloot en de installatie-technicus met vertraging (ook vanwege het weer) uit Emmercompasuum arriveerden, was het enigszins opgeklaard. Wel was de wind inmiddels verder aangetrokken en was er een bijna volledig gesloten, laaghangend wolkendek..

Besloten werd om op te stijgen en de situatie vanuit de lucht te beoordelen. Het zicht uit de helikopter vanaf 500m hoogte werd nog steeds ernstig beperkt door de heiigheid. De bewolking zat doorgaans net iets hoger, maar af en toe dreven er wolkenslierten onder de helikopter door.

Opvallend was dat het opgenomen beeld er op het computerscherm veel beter uitzag. Dit kan verklaard worden doordat de gevoeligheid van digitale camera's in het blauwe gedeelte van het (zichtbare) spectrum relatief gering is, maar enigszins doorloopt tot in het nabije infrarood. Atmosferische effecten treden vooral op in het blauwe gedeelte.

Daarom werd besloten de vlucht niet af te breken. Achteraf moet geconstateerd worden dat de beeldkwaliteit zeer ernstig onder de weersomstandigheden geleden heeft. De beoordeling van het opgenomen beeld werd bemoeilijkt door de grote hoeveelheid omgevingslicht op het scherm, maar vooral doordat de software geen zoomfunctie heeft.

Het wolkendek was vrij dun, maar de dikte was wisselend, zodat de belichtingsomstandigheden tijdens de opnamen voortdurend enigszins varieerden. Daardoor is de mate van schaduwvorming niet bij alle opnamen hetzelfde. De mate van belichting beïnvloedt tevens de helderheid van de opnames, waardoor de integratietijd enkele malen, tussen de opnamereeksen, bijgesteld moest worden. De instelling interfereert enigszins met de waardes voor *gain* en *offset*. Deze waren zorgvuldig bepaald met de proefcamera, voorafgaand aan de vlucht. Achteraf blijkt in de lichte beeldelementen toch enige overbelichting op te treden.

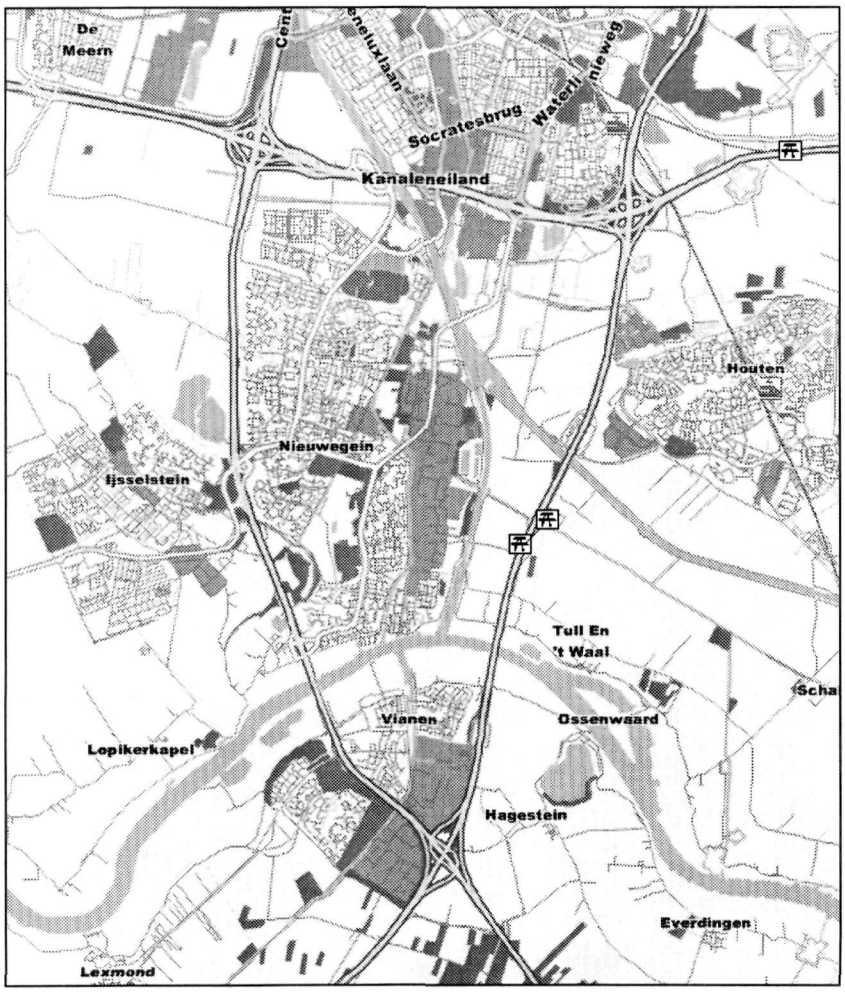
Omdat tijdens de opnamen het beeld niet zichtbaar is, was met de helikopterverhuurder afgesproken dat deze een extra cameraatje + monitor zou monteren om voortdurend het opgenomen terrein te kunnen zien, zodat men de helikopter zonodig bij kon sturen. Helaas had men dit verzuimd, zodat de helikopter uitsluitend op grond van rechtstreekse visuele waarneming van het terrein "stilgehouden" moest worden. De piloot zei het ontbreken van de extra camera geen groot gemis te vinden.

Een andere ongunstige weersomstandigheid bleek de wind te zijn. Deze was niet zozeer te hard, maar vooral te wisselend, waardoor de piloot de grootste moeite had om de helikopter stil te houden. Daardoor is ook de positie van het opgenomen traject in het beeld zeer variabel. De bewegingen in de lengterichting van het traject hebben een afname tot gevolg van de lengte van het stuk dat in de hele reeks zichtbaar is. In de breedterichting is het gevolg het volledige opnameformaat nodig was om het traject in beeld te kunnen houden. Dit leidde tot het besluit om geen *partial scan* te gebruiken, nog afgezien van het feit dat de software dit niet goed ondersteunde.

Figuur 18 Verschillen in opnamegeometrie tengevolge van camerabewegingen

C.2 Chronologisch overzicht meting

Figuur 19 toont de autosnelwegen A2 en A27 waar de gegevens verzameld zijn.



Figuur 19 Overzichtskaart onderzoeksgebied.

Hieronder wordt kort de vlucht en de verschillende meetpunten beschreven.

1 Meevliegen met verkeer vanaf knooppunt Rijnsweerd tot en deels met de fly-over bij Everdingen.
Neus in de rijrichting van het te volgen verkeer
Starttijd: 16 uur 17.
Hoogte: 500 meter

2 Ten zuid oosten van het knooppunt, de invoeging / bottleneck
Neus in noordelijke richting, tegen rijrichting in
Starttijd: 16:38
Hoogte: 500 meter

2b Meevliegen met het verkeer langs A2 in Noordelijke richting, van A2 toerit Ijsselstein (N210) tot Toerit de Meern
Neus in de rijrichting van het te volgen verkeer
Starttijd: 17:27:13
Hoogte: 500 meter

3 Ten zuid oosten van het knooppunt, de invoeging / bottleneck
Neus richting noorden, tegen rijrichting in
Starttijd: 17:07:10
Hoogte 300 meter

4 Midden boven viaduct van A27 over A2
Neus richting Noorden, tegen rijrichting in
Starttijd: 17:17:34
Hoogte 500 meter

5 Ten noord westen van het knooppunt, 2x2 weefvak
Neus richting Noorden, tegen rijrichting in
Starttijd 16:49
Hoogte 500 meter

6 Ten noord westen van het knooppunt, 2x2 weefvak
Neus richting Noorden, tegen rijrichting in
Starttijd 16:58:26
Hoogte 300 meter

D Overzicht vooronderzoek

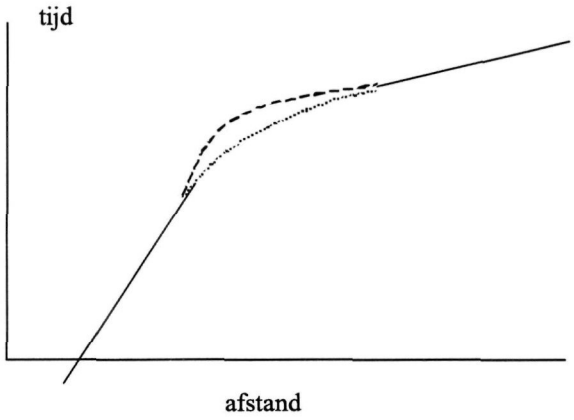
Om de individuele trajectoriën van individuele voertuigen te kunnen meten en volggedrag, strookwisselgedrag enz te kunnen bepalen, moet de positie van voertuigen die in elkaars nabijheid rijden, met voldoende nauwkeurigheid – in plaats en tijd - kunnen worden gemeten. Dat moet voldoende frequent mogelijk zijn. In dit hoofdstuk zal dit nader gespecificeerd worden en zal aangegeven worden hoe dat met digitale fotografie mogelijk is.

Wat betreft strookwisselgedrag is een meting relatief eenvoudig. Hiaatacceptatie bij strookwisselgedrag wordt bepaald door de waarneming van bestuurders. De nauwkeurigheid van een waarnemingssysteem hoeft dan ook niet groter te zijn dan de nauwkeurigheid waarmee een mens snelheden en hiaten kan inschatten. Daarbij mag uitgegaan worden van een nauwkeurigheid van ca. 2 m.

Volggedrag wordt – naar algemeen wordt aangenomen – bepaald door relatieve afstand tussen een auto en zijn voorganger, de snelheid waarmee gereden wordt en het snelheidsverschil met de voorligger. Een nauwkeurigheid van 0,5 m voor de afstand en 0,3 m/s voor het snelheidsverschil en de snelheid lijkt voldoende te zijn. Uitgaande van een snelheid bij congestie van 10 m/s, zou een relatieve nauwkeurigheid van 3% voldoende moeten zijn.

De netto volgafstand tussen auto's wordt bepaald door de reactietijd (≈ 0.5 s). Dat betekent dat een nauwkeurigheid van de volgtijd groter dan 0,1 s weinig zin heeft. Dat komt overeen met ongeveer 1 m/s in gemiddelde congestie. Dat is vrij goed in overeenstemming met de mogelijkheden van bestuurders om de afstand tot hun voorganger te schatten (≈ 10% wat overeenkomt met 2 tot 3 m).

De frequentie waarmee opnames gemaakt moeten worden bepaalt de veranderingen in bestuurdersgedrag die nog kunnen worden waargenomen. De versnellingen en vertragingen die in de praktijk voorkomen zijn in vrijwel alle verkeerscondities kleiner dan 10 m/s^2. Wanneer we versnellingen en vertragingen nauwkeuriger willen weten dan 0,1 m/s^2 en wanneer we het onderscheid willen kunnen meten tussen de twee trajectoriën die in de volgende figuur zijn geschetst, dan mogen we concluderen dat een frequentie van twee beelden per seconde voldoende zou moeten zijn om de trajectorie te kunnen reconstrueren.



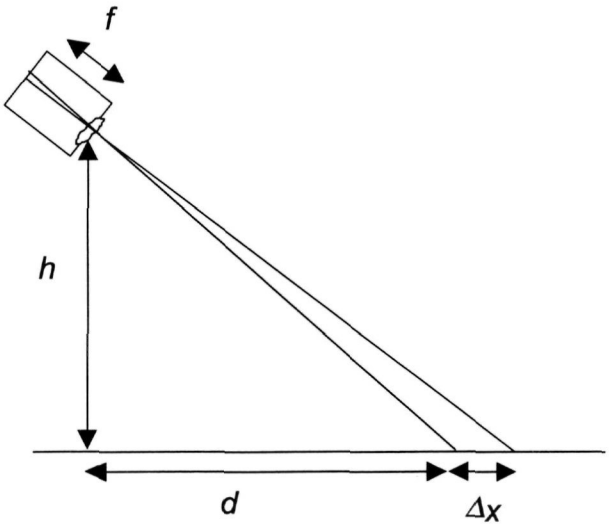
Figuur 20 Twee verschillende trajectoriën die onderling onderscheiden moeten kunnen worden

In het vervolg van dit hoofdstuk gaan we kort in op de toepasbaarheid van digitale cameras (paragraaf 2.2) en videocameras (paragraaf 2.3) en op de mogelijkheden vanaf

verschillende posities de voertuigen waar te nemen: vanuit de lucht (paragraaf 2.4) of vanaf een hoog gebouw (paragraaf 2.5).

D.1 Toepasbaarheid van digitale camera's

De vraag die we nu kunnen proberen te beantwoorden is, of een digitale foto- of videocamera geschikt is om als waarnemingsinstrument te gebruiken. De eis is dat snelheden met 10% nauwkeurigheid gemeten kunnen worden. De tijdregistratie kan zeer nauwkeurig plaatsvinden, zodat de nauwkeurigheid waarmee de snelheid bepaald kan worden, afhangt van de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling. Dat betekent dat voor voertuigen met een snelheid tussen de 5 en 130 km/u de plaatsbepaling een nauwkeurigheid moet hebben tussen de 10 en 250 cm.



Figuur 21 Nauwkeurigheid plaatsbepaling uitgaande van pixelgrootte en scheve opnamerichting

$\Delta x \approx p.(d^2+h^2)/f\ h$

Neem als voorbeeld een digitale camera met de volgende gegevens (ongeveer vereenkomend met een Nikon Coolpix 880).

f = 8 mm
p = 0.005 mm (digitale camera met 1536 x 2048 pixels)
h = 4.5 m (viaduct boven een weg)

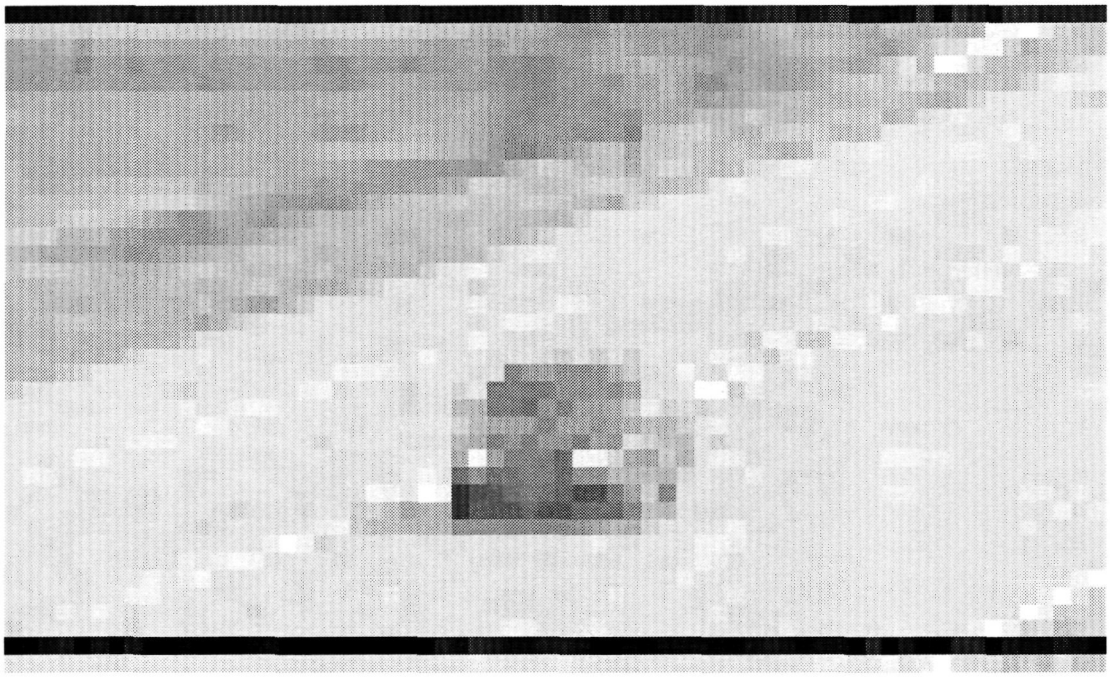
Dit geeft als resultaat voor de eis $\Delta x < 10$ cm, dat *d* niet groter mag zijn dan 70 m. Als d = 200 m, dan is de nauwkeurigheid $\Delta x \approx 5.5$ m.

De laterale nauwkeurigheid is gegeven door

$\Delta y \approx p\ (d^2 + h^2)^{1/2} / f$

wat betekent dat voor d =10 m, $\Delta y = 0.6$ cm en voor d =100 m, $\Delta y = 6$ cm.

Figuur 22 beeld van 640 x 480 pixels



Figuur 23 Uitvergoot kader met pixelgrootte

In de toekomst is het mogelijk gebruik te maken van camera's met een hogere pixeldichtheid. Op dit moment mag men er van uitgaan dat de positie van een voertuig nauwkeurig genoeg bepaald zal kunnen worden vanaf een positie boven de weg tot op een afstand van 100 m van de camera. Dan is de snelheid te meten met een nauwkeurigheid groter dan 2,4 km/u.

De discrepantie tussen de longitudinale en laterale nauwkeurigheid is weg te nemen door op een grotere hoogte voor de camera te kiezen. Bijv. Een hoog gebouw of een vliegtuig. Satellietbeelden zijn nog steeds ongeschikt voor het waarnemen van voertuigtrajectoriën. (de Vries 1999).

Een andere manier om de nauwkeurigheid te vergroten is het toepassen van beeldregistratie op film (analoog) en achteraf digitaliseren van de beelden. De beste registratie op film komt overeen met 18000 bij 18000 pixels, dat is per richting 10 keer beter dan met de beste beschikbare digitale camera.

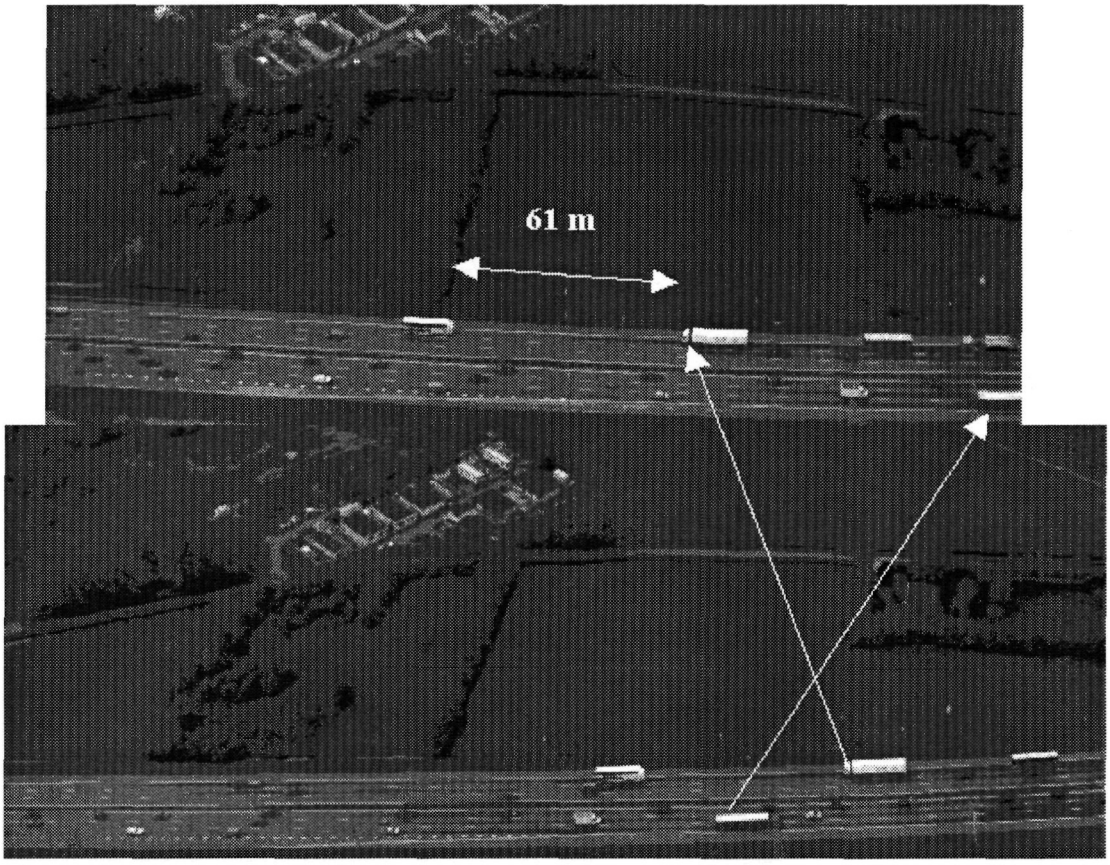
Een ander probleem dat wel optreedt bij opnames vanaf portalen of viaducten, maar niet bij luchtopnames, is het afschermen van voertuigen van elkaar. Daar is een oplossing te vinden door extrapolatie (als een voertuig een tijdlang niet zichtbaar is wordt zijn positie geëxtrapoleerd uit de voorgaande beelden totdat het voertuig weer te voorschijn komt). Een betere oplossing is uiteraard om beelden van grote hoogte te nemen.

D.2 Toepasbaarheid videocamera's

Bosch (2000) deed onderzoek naar mogelijkheden om gebruik te maken van videocamera's voor de meting van de laterale positie van auto's. Hij vond dat tot op een afstand van 100 m een laterale nauwkeurigheid van 5 cm haalbaar was. Dat is weinig minder dan wat een digitale camera te realiseren is en ook nog binnen de eerder gestelde grenzen van de nauwkeurigheid. Bij het gebruik van video voor het meten van snelheden blijkt, naar Dijker et al. (2001) hebben aangetoond, een stelselmatige vertekening op te treden tussen de werkelijke snelheden en de snelheden die met video-opnamen berekend worden. Die afwijking bleef echter binnen de 5%. Dat betekent dat een video met automatische uitlezing nog een redelijk resultaat kan opleveren, al is een digitale camera nauwkeuriger.

D.3 Luchtfotografie

De twee foto's in figuur 5 zijn genomen van 200 m hoogte met een tijdsinterval van ca. 5 s. Figuur 5 toont een selectie van twee beelden opgenomen met 1012 x 1524 pixels. Een pixel komt overeen met ca. 0,2 m. De lengte van de weg op de beelden is ca. 300 m. De afstand tussen de twee vrachtauto's is 61 ± 0.4 m (een relatieve nauwkeurigheid van 0.6%). De afgelegde afstand door de vrachtauto is 724 pixels, wat overeenkomt met 140 m. wanneer de foto's met precies 5 s tussentijd genomen zouden zijn, zou de snelheid 28 m/s (101 km/h) met een onnauwkeurigheid van minder dan 1 %.



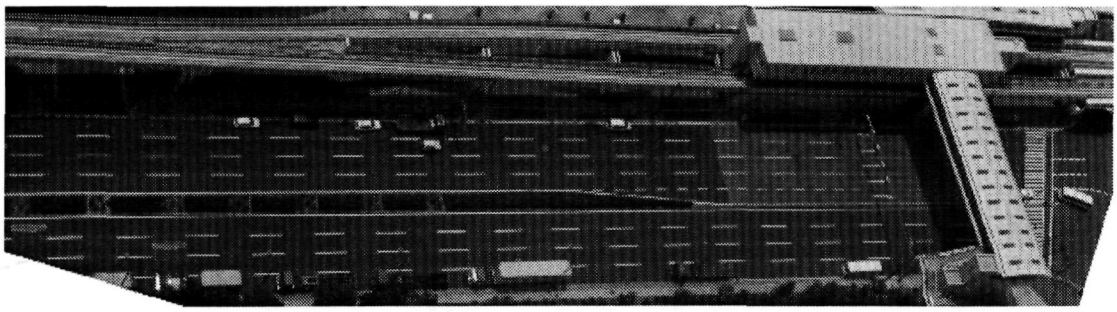
Figuur 24 Twee foto's genomen vanuit een vliegtuig op ca. 200 m hoogte met een camera met 1012 x 1524 pixels

Dit voorbeeld toont aan dat digitale foto's genomen vanaf een hoogte van een paar honderd meter voldoende nauwkeurig zijn om snelheden en afstanden te bepalen Een digitaal beeld dat een wegvak van 1 km toont, genomen met een camera met 1536 x 2048 pixels (Nikon Coolpix 880 bijv.), de nauwkeurigheid is ongeveer 2 %, dwz. Een factor 2 lager dan in het besproken geval.

Wanneer foto's met een frequentie van 1 per seconde genomen worden, is de afgelegde afstand tussen de 3 en 30 m. Uitgaande van de eerder beschreven meting van de snelheid, zal de eenduidige identificatie van een trajectorie geen probleem geven, tenzij de versnelling of vertraging erg hoog is. Bij een versnelling dan wel vertraging van 10 m/s^2 zal de afwijking in de verwachte positie op een volgend beeld niet meer zijn dan 10 m. Dat betekent dat het gebied waarbinnen het voertuig op een volgende foto te vinden moet zijn kleiner is dan de onderlinge afstand tussen twee voertuigen. Daarmee wordt het automatisch volgen van een voertuig mogelijke, afgezien van situaties van zeer dicht verkeer of wanneer er erg vaak van strook wordt gewisseld.

D.4 Foto's vanaf een hoog gebouw

Op plaatsen waar hoge gebouwen dicht bij een weg staan, kunnen beelden vanaf dat gebouw gebruikt worden om voertuigbewegingen te registreren. In het verleden zijn zo opnames gemaakt vanaf het provinciehuis in Den Bosch. Door de afstand tot de weg ontstaan dan problemen met schaduwen en het afdekken van auto's door vrachtauto's die ernaast rijden. De Vries (1999) heeft een analyse uitgevoerd van video-opnames die vanaf het provinciehuis gemaakt zijn.



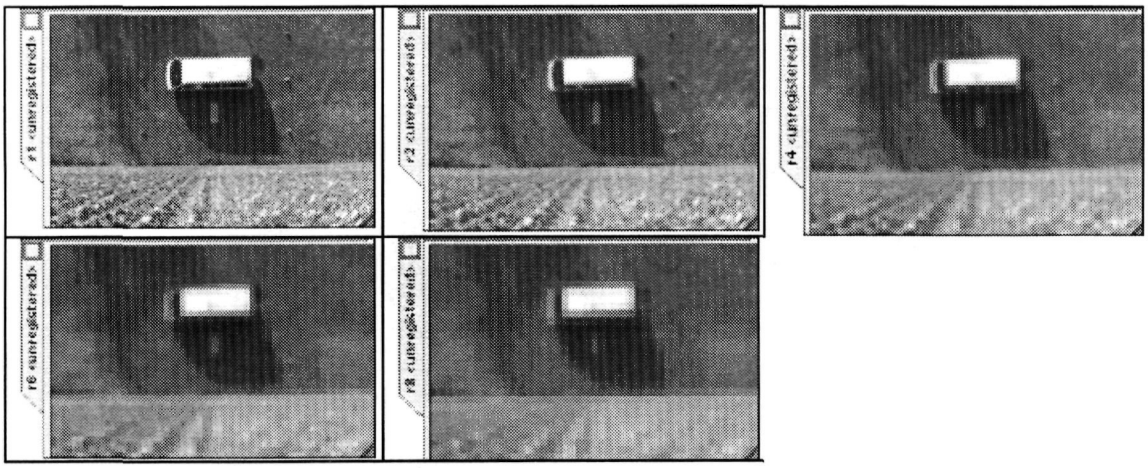
Figuur 25 Beelden genomen vanaf een gebouw van ongeveer 100 m hoogte

Figuur 6 laat een foto zien die genomen is vanaf een hoog gebouw vlak bij een weg. Er zijn hier geen problemen te zien doordat voertuigen in het beeld elkaar afdekken. Ook schaduwen geven op deze foto geen storende effecten. Wanneer we er van uit mogen gaan dat ook op deze foto – die in Japan genomen is - de strookbreedte 3,5 m is, dan stelt 1 pixel ongeveer 10 cm lateraal en 6 cm longitudinaal voor. De afstand tussen twee geparkeerde voertuigen is te bepalen met een nauwkeurigheid van ongeveer 3 %.

D.5 Proefopnames pilot

In het kader van het in dit rapport beschreven project, zijn een aantal proefopnames gemaakt, waaronder proefopnames vanuit het Geodesie gebouw (A13) en vanuit de Malietoren (A12).

Proefopnames Geodesiegebouw
Vanaf het dak van het Geodesiegebouw (ca. 20m hoogte) zijn opnames gemaakt met een digitale camera (Kodak DCS) van een bestelbus onder verschillende hoeken.



Figuur 26 Opname vanaf geodesiegebouw, geresampled naar verschillende resoluties

Het doel was het vaststellen van de nauwkeurigheid van voertuigpositionering als functie van de beeldresolutie en de opnamehoek (verticaal, schuin van voren / achteren). Tijdens de opnamen waren meetmerken op de grond geplaatst, zodat de positie van het voertuig ten opzichte hiervan bepaald kon worden. Dit is gedaan bij een groot aantal verschillende ruimtelijke resoluties, variërend van ca. 2 tot ca. 60 cm. De beelden met de lagere resoluties werden door middel van *subsampling* uit de oorspronkelijke beelden afgeleid. Het gevaar van *aliasing* en van overdreven goede scherpte, dat zich hierbij voordoet, werd met behulp van geschikte filter-operaties (convoluties) afgewend.

Hieruit bleek dat bij opnamehoeken tussen ca. -30° en +30° een herhalingsnauwkeurigheid van beter dan ¼ pixel haalbaar was. Voor de in het project

gevraagde nauwkeurigheid van 10 cm zou dus een beeldresolutie van 40 cm voldoende zijn.

Proefopnames A12

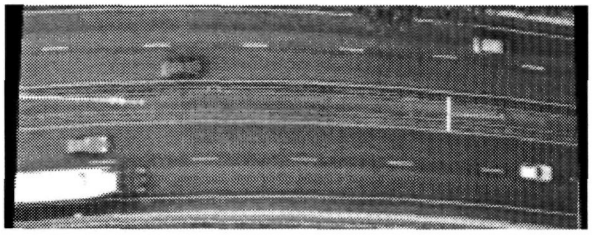
Een tweede serie proefopnames is genomen van de A12 (Utrechtsebaan) te Den Haag, van ca. 70m hoogte, vanaf de hoogste verdieping van gebouw de Malietoren, waar de snelweg onderdoor loopt. De lengte van het opgenomen weggedeelte bedraagt ca 50 m.

Figuur 27 Opname A12 vanaf Malietoren

De gebruikte camera was een eenvoudige digitale consumentencamera Canon Digital IXUS. Dit is een zogenaamde 2-megapixel camera (met een beeldresolutie van 1600 x 1200 pixels) met een 2x-zoomlens. De opnames zijn gemaakt in de lage-resolutie stand van 640x480 pixels. Dan is het mogelijk om korte reeksen op te nemen (10 tot 12 beelden) met een opnamefrequentie van ca. 1 fps. Er zijn kleurenopnames gemaakt.

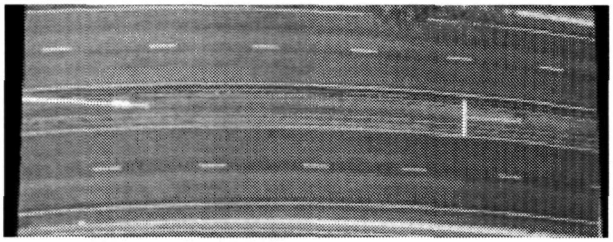
Het doel van deze opnames was het onderzoeken en verder ontwikkelen van diverse bewerkingstappen (deze worden in hoofdstuk 4 uitvoerig beschreven):

- geometrische voorbewerking (ontschranken)
- afleiden achtergrondbeeld
- voertuigdetectie
- bepalen van voertuigverplaatsingen in opeenvolgende beelden en van de nauwkeurigheid.



Figuur 28 Ontschrankt beeld

Voor al deze punten werden methodieken ontworpen, gebruik makend van bestaande en gedeeltelijk nieuwe software, en werden bemoedigende resultaten bereikt. Het ontschranken was relatief gemakkelijk omdat alle opnames van precies hetzelfde standpunt genomen waren, en ook de stand van de camera niet al te veel varieerde. In plaats van een statief te gebruiken, was er getracht de rotaties van de camera in een helikopter enigszins te simuleren – naar later bleek waren de opnames veel te stabiel om als goede simulatie te kunnen dienen.



Figuur 29 Achtergrondbeeld

De ruimtelijke resolutie van de oorspronkelijke opnames en van de ontschrankte beelden bedroeg ca. 8 cm. Hiervan zijn d.m.v. *subsampling* (in combinatie met filteren) verschillende series opnames afgeleid met ruimtelijke resoluties van ca. 16, 24, 32, 40 en 48 cm. Een ruimtelijke resolutie van 40cm bleek optimaal voor voertuigdetectie: de voertuigen bestaan nog uit een voldoende aantal pixels terwijl verschijnselen als het bewegen van boomtakken in de resolutie verdwijnen en niet tot onterechte detecties leiden. De verplaatsing van voertuigen in opeenvolgende beelden bleek ook nu met ca. ¼ pixel nauwkeurigheid (10 cm) bepaald te kunnen worden.

D.6 Conclusies

Op basis van de bespiegelingen die in dit hoofdstuk zijn beschreven en de resultaten van de proefmetingen is geconcludeerd dat de ontwikkeling van een nieuw meetsysteem kansrijk is. Zoals in het volgende hoofdstuk is beschreven, is uiteindelijk gekozen voor het waarnemen van de verkeersstroom vanuit de lucht met behulp van een digitale camera. Het volgende hoofdstuk zal hier uitvoerig op ingaan.

Technische Universiteit Delft
Faculteit CiTG
Bibliotheek Civiele Techniek
Stevinweg 1
2628 CN Delft

Verwijderd uit catalogus
TU Delft Library

Sectie
Verkeerskunde

De sectie Verkeerskunde houdt zich bezig met Onderwijs en onderzoek op het gebied van Planning, alsmede het functioneel ontwerp van verkeersinfrastructuur.

De sectie Verkeerskunde maakt deel uit van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft en participeert in de onderzoeksschool TRAIL.

The Transportation Planning and Traffic Engineering Section provides university education and performs fundamental-scientific research on the wide area of traffic, transport, logistics and infrastructure; in addition to that, the section makes develops new fundamental design for traffic infrastructures.

The section is part of the Faculty of Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology in the Netherlands and is a partner in the post-graduate Research School TRAIL.

VK rapport 2002-006
ISSN: 0920-0592