

Universiteit Antwerpen
Universitaire Instelling Antwerpen
Departement Wiskunde-Informatica

Het gebruik van microscopische
verkeerssimulatie bij een onderzoek
naar de fileproblematiek op de
Antwerpse ring

Sven Maerivoet

Academiejaar 2000 - 2001

Thesisonderwerp ingediend tot het behalen van
de graad Licentiaat in de Wetenschappen

Promotor: **Prof. dr. Serge Demeyer**

Samenvatting

Met de steeds toenemende verkeersdruk op het Belgische wegennetwerk rijst de nood aan betere manieren om het wegtransport veiliger en efficiënter te laten verlopen.

Vanuit dit standpunt analyseert deze thesis de invloed van enkele potentiële oplossingen, meerbepaald het fundamenteel wijzigen van de wegenstructuur (door middel van extra rijvakken), aanpassen van het verkeersreglement (met betrekking tot beperkingen op de snelheid en het gebruik van rijvakken door vrachtverkeer alsmede het opleggen van een inhaalverbod) en veranderen van het rijgedrag van bestuurders (namelijk de eliminatie van middenvakrijders).

Als analysemethode wordt gebruik gemaakt van een microscopische verkeerssimulator, gebaseerd op een wiskundig model dat de relevante aspecten uit de literatuur combineert en aangepast is aan de specifieke situaties op de Antwerpse Ring. Op basis van uitgevoerde simulaties kan gesteld worden dat het toevoegen van extra rijvakken geen significante invloed heeft op het gebied van zowel veiligheid als efficiëntie. Wijzigingen in het verkeersreglement bieden eveneens geen goede oplossing. Daarentegen blijkt dat het begrijpen van de rol die middenvakrijders spelen van groot belang is. Een verrassend resultaat is dat zij – indien niet te talrijk aanwezig – een verkeersstroom optimaler kunnen laten vloeien. Vandaar dat het in deze thesis verrichte onderzoek bijdraagt tot het verkrijgen van inzicht in de complexe en drukke situaties op onze autosnelwegen, waardoor het effect van bepaalde maatregelen met betrekking tot verkeersbeheer op onze economie afgewogen kan worden.

Van groot belang is dat er een mentaliteitsverandering moet komen bij de bestuurders (zich aan de snelheid houden, geen onnodige risico's nemen die de veiligheid in het gedrang brengen) en een algemene coördinatie op grote schaal (wat aanleiding kan geven tot het gebruik van Intelligente Transport Systemen).

Thesiscomité

Professor doctor Serge Demeyer

Departement Wiskunde-Informatica

Universitaire Instelling Antwerpen

Universiteit Antwerpen

Licentiaat Tom Van Woensel

Faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen

Universitaire Faculteiten Sint-Ignatius te Antwerpen

Universiteit Antwerpen

Licentiaat Stijn Dekeyser

Departement Wiskunde-Informatica

Universitaire Instelling Antwerpen

Universiteit Antwerpen

Licentiaat Benny Vanhoudt

Departement Wiskunde-Informatica

Universitaire Instelling Antwerpen

Universiteit Antwerpen

*Onbedachtzaam knippen en plakken
is een bron van veel kwaad.*

Sven Maerivoet

Dit werk is opgedragen aan Sanne Engelen.

Woord van dank

Mijn dank gaat uit naar de volgende personen :

- prof. dr. Serge Demeyer (UIA) voor de uitstekende begeleiding bij het schrijven van deze thesis ; dankzij hem was er orde in de chaos en ging het allemaal een pak vlotter,
- lic. Gunther Stuer, lic. Ignace Saenen en lic. Olivier Verberckmoes (RUCA) die mij altijd uitgebreid antwoord gaven op al mijn vragen omtrent het programmeren in de Java-omgeving,
- dr. Qi Yang (werkend bij Caliper) met wie ik via email contact had ; zijn publicaties en de vakgroep op het MIT (waar hij deel van uitmaakte) vormden voor mij de basis waarop ik kon voortbouwen,
- prof. dr. Haris Koutsopoulos (Volpe National Transportation Center) die zo vrijgevig was zijn cursusnotities (MIT Summer Professional Program 1.10s, augustus 1999) te mijner beschikking te stellen,
- de Rijkswacht Verkeerspost te Antwerpen en het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap die me hun infrastructuur lieten gebruiken, de lokaties van de camera's en lusdetectoren – gebruikt voor voertuigtellingen – te kennen gaven en bereid waren tot het uitwisselen van ideeën,
- lic. Tom Van Woensel (UFSIA) die me van extra verhandelingen voorzag en bereid was mee in het thesiscomité te zetelen, alsmede lic. Stijn Dekeyser en lic. Benny Vanhoudt die extra advies gaven tijdens het schrijven van de tekst,
- Sanne, Beer en mijn ouders die me mentaal steunden, de taalfouten uit mijn thesistekst haalden en me geregeld stof tot nadenken schonken
- en tot slot de talrijke mensen uit de jeugdbeweging K.S.A., mijn familie en mijn collega's op de universiteit die constant door mijn onderzoek gefascineerd bleven.

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| I | De grondbeginselen | 4 |
| 1 | Inleidende begrippen | 8 |
| 1.1 | Meettechnieken | 8 |
| 1.1.1 | Metingen in een punt | 10 |
| 1.1.2 | Metingen over een deel van de rijbaan | 12 |
| 1.1.3 | Metingen uitgevoerd door een bewegende waarnemer | 13 |
| 1.1.4 | Metingen met behulp van externe communicatie | 14 |
| 1.2 | Karakteristieken van verkeersstromen | 15 |
| 1.2.1 | Doorstromingsgraad (<i>flow rate</i>) | 15 |
| 1.2.2 | Snelheid | 16 |
| 1.2.3 | Bezetting | 19 |
| 1.2.4 | Concentratie | 21 |
| 1.3 | Conclusies | 22 |
| 2 | Modellen van verkeersstromen | 23 |
| 2.1 | Oorzaken van filevorming | 23 |
| 2.2 | Empirische stroommodellen | 25 |
| 2.2.1 | Snelheid-doorstromingsgraad modellen | 25 |
| 2.2.2 | Snelheid-dichtheid modellen | 29 |
| 2.2.3 | Doorstromingsgraad-concentratie modellen | 30 |
| 2.2.4 | Drie-dimensionale modellen | 31 |
| 2.2.5 | Conclusies | 33 |
| 2.3 | Continue stroommodellen | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3.1 | Behoud van doorstroming | 34 |
| 2.3.2 | Analytisch oplossen van de eerste orde continuïteitsvergelijking : schokgolven | 36 |
| 2.3.3 | Hogere orde continue stroommodellen | 39 |
| 2.3.4 | Stochastische continue stroommodellen | 40 |
| 2.3.5 | Conclusies | 41 |
| 2.4 | Macroscopische stroommodellen | 41 |
| 2.4.1 | Performantie van een verkeerssysteem | 42 |
| 2.4.2 | Reistijd modellen | 43 |
| 2.4.3 | Algemene netwerk modellen | 43 |
| 2.4.4 | De α -relatie | 43 |
| 2.4.5 | De twee-stromen theorie | 44 |
| 2.4.6 | Conclusies | 47 |
| 2.5 | Stroommodellen gebaseerd op wachtrij-theorie | 47 |
| 2.5.1 | Theoretische achtergrond | 47 |
| 2.5.2 | Het M/M/1 wachtrij-model | 48 |
| 2.5.3 | Het M/G/1 wachtrij-model | 49 |
| 2.5.4 | Het G/G/1 wachtrij-model | 50 |
| 2.5.5 | Het toestandsafhankelijk G/G/1 wachtrij-model | 51 |
| 2.5.6 | Conclusies | 51 |
| 2.6 | Conclusies | 52 |
| 3 | Modellen van bestuurdersgedrag | 54 |
| 3.1 | Menselijke factoren | 55 |
| 3.1.1 | De kunst van het rijden | 55 |
| 3.1.2 | Waarnemingsreactietijd | 56 |
| 3.1.3 | Bewegingstijd | 57 |
| 3.1.4 | Zichtbaarheid | 57 |
| 3.1.5 | Reactie op andere voertuigen | 58 |
| 3.1.6 | Individuele verschillen in de performantie van bestuurders | 59 |
| 3.1.7 | Andere factoren | 61 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.8 | Conclusies | 61 |
| 3.2 | Voertuig-volg modellen (<i>car-following models</i>) | 62 |
| 3.2.1 | Gemiddelde tussenruimte | 62 |
| 3.2.2 | Modelontwikkeling | 63 |
| 3.2.3 | De wiskundige basis | 64 |
| 3.2.4 | Algemene voertuig-volg modellen | 68 |
| 3.2.5 | Modelvalidatie en schatten van parameters | 69 |
| 3.2.6 | Automatische voertuig-volg modellen | 70 |
| 3.2.7 | Conclusies | 70 |
| 3.3 | Vak-verander modellen (<i>lane-change models</i>) | 71 |
| 3.3.1 | Het hart van vak-verander modellen | 71 |
| 3.3.2 | Enkele ontwikkelde modellen | 72 |
| 3.3.3 | Een wiskundige vertaling | 73 |
| 3.3.4 | Conclusies | 75 |
| 3.4 | Conclusies | 75 |
| 4 | Simulators | 77 |
| 4.1 | Wanneer dient men simulatiemodellen te gebruiken ? | 78 |
| 4.2 | Classificatie van simulators | 79 |
| 4.2.1 | Klok-gedreven simulators | 79 |
| 4.2.2 | Gebeurtenis-gedreven simulators | 80 |
| 4.2.3 | Macroscopische simulators | 80 |
| 4.2.4 | Mesoscopische simulators | 81 |
| 4.2.5 | Microscopische simulators | 82 |
| 4.2.6 | Conclusies | 82 |
| 4.3 | Enkele simulators | 83 |
| 4.3.1 | TRAQ | 83 |
| 4.3.2 | DynaMIT | 85 |
| 4.3.3 | MITSIM | 87 |
| 4.4 | Conclusies | 90 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| II | Wetenschappelijke afbakening | 91 |
| 5 | Probleemstelling | 92 |
| 5.1 | Inherente moeilijkheden | 92 |
| 5.1.1 | Fileproblematiek | 93 |
| 5.1.2 | Verkeerssimulatie | 94 |
| 5.1.3 | Microscopisch | 95 |
| 5.1.4 | Conclusies | 95 |
| 5.2 | Probleemomschrijving | 96 |
| 5.2.1 | Beschrijving van de te volgen stappen in het probleem . . . | 96 |
| 5.2.2 | Antwerpse Ring ? | 98 |
| 5.2.3 | Situering | 99 |
| 5.3 | Conclusies | 101 |
| 6 | Oplossingsmethodes | 102 |
| 6.1 | Evaluatiemethodes | 103 |
| 6.1.1 | Veldtesten | 103 |
| 6.1.2 | Computersimulaties | 104 |
| 6.1.3 | Conclusies | 105 |
| 6.2 | Enkele gemaakte keuzes | 105 |
| 6.2.1 | Type simulator | 106 |
| 6.2.2 | Weersomstandigheden | 107 |
| 6.2.3 | Karakteristieken van de rijbaan | 107 |
| 6.2.4 | Menselijke factoren | 109 |
| 6.2.5 | Conclusies | 111 |
| 6.3 | Het wiskundig model | 111 |
| 6.3.1 | Het wegennetwerk | 111 |
| 6.3.2 | De karakteristieken van de bestuurders | 113 |
| 6.3.3 | De karakteristieken van de voertuigen | 114 |
| 6.3.4 | Het voertuig-volg model | 116 |
| 6.3.5 | Het vak-verander model | 121 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.3.6 | De reiswegen van de voertuigen | 125 |
| 6.3.7 | Het genereren van de voertuigen | 125 |
| 6.3.8 | Conclusies | 126 |
| 6.4 | Implementatie van de simulator | 127 |
| 6.4.1 | Interne voorstellingen | 127 |
| 6.4.2 | Het hart van de simulator | 128 |
| 6.4.3 | Conclusies | 131 |
| 6.5 | Conclusies | 131 |

III Empirische methode 132

7 Gebruik van realistische gegevens 133

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.1 | Reactietijden | 133 |
| 7.1.1 | De tests | 134 |
| 7.1.2 | Resultaten van de proefpersonen | 135 |
| 7.1.3 | Verwerking van de resultaten | 135 |
| 7.1.4 | Conclusies | 138 |
| 7.2 | Het gebruikte wegennetwerk | 139 |
| 7.2.1 | Van waar komen de gegevens ? | 139 |
| 7.2.2 | Hoe worden deze gegevens verwerkt ? | 139 |
| 7.2.3 | Conclusies | 140 |
| 7.3 | Doorstromingsgraden | 140 |
| 7.3.1 | Van waar komen de gegevens ? | 141 |
| 7.3.2 | Een waarschuwend woordje | 142 |
| 7.3.3 | Hoe worden de gegevens verwerkt ? | 142 |
| 7.3.4 | Conclusies | 143 |
| 7.4 | Conclusies | 144 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 8 | Validatie van het gebruikte model | 145 |
| 8.1 | Programmeerfouten | 145 |
| 8.2 | Validatie van de simulator | 146 |
| 8.2.1 | Respecteren van de volgafstand | 147 |
| 8.2.2 | De logica bij het van vak veranderen | 147 |
| 8.2.3 | Het tunneleffect | 148 |
| 8.2.4 | Conclusies | 148 |
| 8.3 | Kalibratie van de simulator | 148 |
| 8.4 | Uitvoeren van het referentie-experiment | 149 |
| 8.4.1 | Standaardwaarden voor de parameters | 149 |
| 8.4.2 | Resultaten van het experiment | 150 |
| 8.4.3 | Conclusies | 152 |
| 8.5 | Conclusies | 153 |
| 9 | Hypotheses, experimenten en evaluaties | 154 |
| 9.1 | Uitvoeren van de experimenten | 155 |
| 9.2 | Het veranderen van de snelheidsbeperking | 155 |
| 9.2.1 | Korte beschrijving | 155 |
| 9.2.2 | Vorbereiden van de experimenten | 155 |
| 9.2.3 | Resultaten van de experimenten | 156 |
| 9.2.4 | Conclusies | 157 |
| 9.3 | Het opleggen van een inhaalverbod | 158 |
| 9.3.1 | Korte beschrijving | 158 |
| 9.3.2 | Vorbereiden van de experimenten | 158 |
| 9.3.3 | Resultaten van de experimenten | 158 |
| 9.3.4 | Conclusies | 160 |
| 9.4 | Beperkingen op het baangebruik door zwaar verkeer | 160 |
| 9.4.1 | Korte beschrijving | 160 |
| 9.4.2 | Vorbereiden van de experimenten | 161 |
| 9.4.3 | Resultaten van de experimenten | 161 |
| 9.4.4 | Conclusies | 163 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.5 | De invloed van middenvakrijders | 163 |
| 9.5.1 | Korte beschrijving | 163 |
| 9.5.2 | Vorbereiden van de experimenten | 163 |
| 9.5.3 | Resultaten van de experimenten | 164 |
| 9.5.4 | Conclusies | 165 |
| 9.6 | Het gebruik van een extra vak | 166 |
| 9.6.1 | Korte beschrijving | 166 |
| 9.6.2 | Vorbereiden van de experimenten | 166 |
| 9.6.3 | Resultaten van de experimenten | 166 |
| 9.6.4 | Conclusies | 168 |
| 9.7 | Conclusies | 168 |
| IV | En verder... | 170 |
| 10 | Nabespreking | 171 |
| 10.1 | Samenvatting | 171 |
| 10.2 | Een kritische beschouwing van het model | 172 |
| 10.2.1 | Ondersteunde linktypes | 172 |
| 10.2.2 | Berekende doorstromingsgraden | 173 |
| 10.2.3 | Gebruikte modellen | 173 |
| 10.2.4 | Geen weersomstandigheden | 173 |
| 10.2.5 | Conclusies | 174 |
| 10.3 | Maatschappelijke bijdrage | 174 |
| 10.4 | De toekomst | 175 |
| 10.4.1 | Op korte termijn | 175 |
| 10.4.2 | Op lange termijn | 175 |
| V | Appendices | 176 |
| A | Lijst van afkortingen | 177 |

| | |
|--|------------|
| B De fundamentele vergelijking | 178 |
| C Simulatieparameters | 180 |
| C.1 Linktypes | 180 |
| C.2 Karakteristieken van bestuurders | 181 |
| C.3 Karakteristieken van voertuigen | 186 |
| C.4 Modelparameters | 188 |
| D Mitrasim 2000 | 190 |
| D.1 Configurator | 191 |
| D.2 Network Modeler | 191 |
| D.3 Network Viewer | 192 |
| D.4 Mitrasim | 193 |
| D.5 Remote Control | 195 |
| D.6 Visualizer | 196 |
| D.7 React | 197 |
| Bibliografie | 198 |
| Index | 202 |

Lijst van figuren

| | | |
|------|--|----|
| 1 | Rustig rijden op een autosnelweg. | 5 |
| 2 | Inhalen kan veilig gebeuren. | 5 |
| 3 | Druk verkeer. | 6 |
| 4 | Inhalen is veel te riskant. | 6 |
| 5 | Een golf van remmende voertuigen. | 6 |
| 6 | Een golf van stoppende en vertrekkende voertuigen. | 7 |
| 1.1 | Het tijd-ruimte diagram voor metingen. | 10 |
| 2.1 | Het fundamenteel diagram van verkeertheorie. | 24 |
| 2.2 | De basisgrafiek voor de snelheid-doorstromingsgraad relatie. | 26 |
| 2.3 | De grafiek voor de snelheid-doorstromingsgraad relatie volgens Greenshields. | 28 |
| 2.4 | De grafiek voor de snelheid-dichtheid relatie volgens Greenshields. | 30 |
| 2.5 | Een typische grafiek voor de doorstromingsgraad-concentratie relatie. | 32 |
| 2.6 | Snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid samen beschouwd. | 33 |
| 2.7 | Rijbaangedeelte gebruikt voor het afleiden van behoud van doorstroming. | 35 |
| 2.8 | Vorming van een schokgolf bij het oplossen van de continuïteitsvergelijking. | 38 |
| 2.9 | De grafiek voor de snelheid-dichtheid relatie volgens het M/G/1-wachtrij-model. | 50 |
| 2.10 | De lineaire en verschillende exponentiële functies voor de nominale snelheid v_n | 52 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.1 | Het volgen van een voertuig. | 62 |
| 3.2 | Diverse parameters bij een vakverandering. | 73 |
| 4.1 | Discretisering van tijd en ruimte. | 81 |
| 5.1 | Een satellietfoto van het te bestuderen stuk van de R1. | 100 |
| 6.1 | Het tunneleffect. | 108 |
| 6.2 | De invloed tijdens het versnellen van de voertuig-volg parameters op de versnelling. | 119 |
| 6.3 | De invloed tijdens het vertragen van de voertuig-volg parameters op de versnelling. | 120 |
| 6.4 | De kans op het uitvoeren van een verplichte vakverandering in functie van de afstand afgelegd op een oprit/afrit. | 122 |
| 7.1 | De lognormale verdeling van de reactietijden. | 138 |
| 8.1 | Het aantal voertuigen neemt steeds minder snel toe naarmate de simulator langer draait. | 151 |
| 8.2 | De snelheid-doorstromingsgraad grafiek van het referentie-experiment. | 151 |
| 8.3 | De dichtheid-snelheid grafiek van het referentie-experiment. | 152 |
| 8.4 | De dichtheid-doorstromingsgraad grafiek van het referentie-experiment. | 153 |
| 9.1 | Resultaten van experiment 1 bekomen aan lusdetector LD1. | 156 |
| 9.2 | Resultaten van experiment 1 bekomen aan lusdetector LD2. | 157 |
| 9.3 | Resultaten van experiment 2 bekomen aan lusdetector LD3. | 159 |
| 9.4 | Resultaten van experiment 2 bekomen aan lusdetector LD4. | 159 |
| 9.5 | Resultaten van experiment 3 bekomen aan lusdetector LD1. | 162 |
| 9.6 | Resultaten van experiment 3 bekomen aan lusdetector LD2. | 162 |
| 9.7 | Resultaten van experiment 4 bekomen aan lusdetector LD3. | 164 |
| 9.8 | Resultaten van experiment 4 bekomen aan lusdetector LD4. | 165 |
| 9.9 | Resultaten van experiment 5 bekomen aan lusdetector LD1. | 167 |
| 9.10 | Resultaten van experiment 5 bekomen aan lusdetector LD2. | 167 |

| | | |
|-----|--|-----|
| C.1 | De reactietijden van Sanne Engelen (uitgedrukt in s). | 182 |
| C.2 | De reactietijden van Sven Maerivoet (uitgedrukt in s). | 182 |
| C.3 | De reactietijden van Helga Boon (uitgedrukt in s). | 183 |
| C.4 | De reactietijden van Jo Maerivoet (uitgedrukt in s). | 183 |
| C.5 | De reactietijden van Franky Backeljauw (uitgedrukt in s). | 184 |
| C.6 | Absolute frequenties van de reactietijden (gegroepeerd per 0,1 s) van alle proefpersonen. | 184 |
| | | |
| D.1 | Het overzichtsscherm van <i>Configurator</i> | 191 |
| D.2 | Werken met <i>Network Modeler</i> aan de Ring (Linkeroever). | 192 |
| D.3 | Het aanpassen van al dan niet toegelaten vakovergangen is zeer eenvoudig. | 193 |
| D.4 | Een drie-dimensionaal beeld dat gegenereerd werd met <i>Network Viewer</i> | 193 |
| D.5 | Het werken in een client/server-omgeving. | 194 |
| D.6 | Het besturen van de simulator gebeurt met <i>Remote Control</i> | 195 |
| D.7 | Een drie-dimensionaal animatiebeeld gegenereerd door <i>Visualizer</i> | 196 |
| D.8 | Het meten van reactietijden met <i>React</i> | 197 |

Lijst van tabellen

| | | |
|------|---|-----|
| C.1 | Beschikbare linktypes. | 180 |
| C.2 | Experimenteel vastgestelde reactietijden (uitgedrukt in s) van de proefpersonen. | 181 |
| C.3 | Cumulatieve distributiefunctie van het percentage bestuurders dat de snelheidsbeperking overtreedt (ν uitgedrukt in km/u). | 185 |
| C.4 | Dimensies van voertuigen (uitgedrukt in m). | 186 |
| C.5 | Maximale snelheid (uitgedrukt in km/u). | 186 |
| C.6 | Maximale versnelling op vlak terrein (uitgedrukt in m/s^2). | 186 |
| C.7 | Normale vertraging (uitgedrukt in m/s^2). | 186 |
| C.8 | Maximale vertraging (uitgedrukt in m/s^2). | 187 |
| C.9 | Algemene simulatieparameters. | 188 |
| C.10 | Parameters voor het voertuig-volg model. | 188 |
| C.11 | Parameters voor het voertuig-volg regime. | 188 |
| C.12 | Parameters voor het vak-verander model. | 189 |

Inleiding

Situatieschets

Nu we op het einde van de twintigste eeuw aangekomen zijn en we de verkeersbalans opmaken, dan blijkt dat er een opmerkelijk fenomeen de kop opsteekt : filevorming. Onder steeds meer verschillende gezichten wordt er aandacht aan dit probleem besteed, zelfs de media is hierop gesprongen waardoor steeds meer mensen bewust worden van de hele heisa rond de verkeersproblematiek in ons land.

Het is van onmiddellijk belang dat hier sterke aandacht aan wordt geschonken : een efficiënt gebruik van transportmiddelen komt de economie zeer ten goede. Eén van de meest markante problemen in het dagelijkse wegverkeer is dat de vraag het aanbod ruimschoots overstijgt. Vermits het vervoer veel sterker toeneemt dan de beschikbare baancapaciteit, zal de situatie naar de toekomst toe blijven verergeren tenzij er naar oplossingen wordt gezocht. Deze oplossingen situeren zich hoofdzakelijk op twee verschillende vlakken : men kan enerzijds de baancapaciteit verhogen en anderzijds kan men proberen het gedrag van de automobilisten te veranderen. Vooral dit laatste lijkt een betere oplossing aangezien het niet zo direct mogelijk is om extra rijvakken te voorzien (er dienen immers diverse factoren zoals plaatsgebrek, beschikbare middelen, geld en milieu in rekening gebracht te worden). Het ontwikkelen van zogenaamde *Intelligente Transport Systemen* (ITS) is een trend die door meer en meer landen aangemoedigd wordt. Vooral in de Verenigde Staten werd hier uitgebreid onderzoek naar verricht. Deze nieuwe aanpak van verkeersopstoppingen geeft aanleiding tot de term *verkeersbeheer* : de verkeerssituatie wordt onder de loep genomen, mogelijke oplossingen worden uitgewerkt en dit alles wordt in real-time via terugkoppeling (*feedback*) teruggestuurd naar de verkeerssituatie (merk op dat deze manier van werken een hoge graad van interactiviteit vereist).

De wetenschappelijke studie naar verkeersstromen begon al in de vroege jaren '30 met de toepassing van kanstheorie op de beschrijving van wegverkeer [Ada36].

Gedurende de daaropvolgende vijftien jaren werden wiskundige modellen ontwikkeld die deze stromen trachten te beschrijven. Begin jaren '50 werden wachtrijtheorieën, vloeistofmodellen en voertuig-volg modellen (*car-following models*) toegepast op verkeersstromen. De grote doorbraak kwam er nadat D.L. Gerlough in 1955 zijn verhandeling getiteld "*Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable computer*" publiceerde aan de Universiteit van California. Dit gaf aanleiding tot het gebruik van computersimulaties in het onderzoek naar verkeersstromen [Pur99]. Sindsdien ontwikkelden deze simulaties zich van een onderzoeksmiddel voor een beperkte groep van experts tot een algemeen gebruikte technologie bij het onderzoek naar, plannen, demonstreren en ontwikkelen van verkeerssystemen.

Rond 1959 waren de theorieën over verkeersstromen zo ontwikkeld dat het wenselijk werd om er een symposium over te houden. Dit stond bekend onder de naam "*The First International Symposium on The Theory of Traffic Flow*". Het ging door in de onderzoekslaboratoria van General Motors (GM) te Warren (Michigan) tijdens de maand december. Sindsdien wordt om de drie jaar dit symposium herwat. Naarmate de globale interesse toenam, ontwikkelden zich ook talrijke nevenonderzoeksgroepen met als resultaat dat het niet meer praktisch mogelijk is om alles te dekken met één type symposium. Vandaar dat er elk jaar ook talrijke bijeenkomsten in diverse landen worden georganiseerd.

Doelstellingen van deze thesis

Deze thesis heeft als doel een overzicht te geven van wat verkeerssimulatie eigenlijk omvat, hoe dit gebeurt en wat de gevolgen zijn van de door mij gemaakte keuzes bij dit onderzoek. Vervolgens wordt een concrete, realistische toepassing uitgewerkt : de opstoppingen aan de Kennedytunnel te Antwerpen. Verschillende hypothesen worden voorgelegd en telkens worden er experimenten gedaan waarna de resultaten besproken worden. Het uitvoeren van deze experimenten gebeurt door middel van een door mezelf ontwikkelde microscopische verkeerssimulator, 'Mitrasm 2000' genaamd.

Motivatie tot schrijven

Het idee voor het schrijven van deze thesis was om eens te kijken wat er met beperkte middelen bereikt kan worden inzake de complexe fileproblematiek. Factoren die een grote rol speelden, zijn mijn persoonlijke interesse in het onderzoeksgebied, de dagelijkse confrontatie met de realiteit ervan (ik rijd via de Ken-

nedy- en Craeybeckstunnel vanuit mijn woonplaats naar de universiteit en terug) en de enorme programmeeruitdaging om vanaf nul een werkende simulator op te bouwen die op maat gesneden is voor de taak die hij wordt geacht te vervullen (namelijk het zo realistisch mogelijk nabootsen van het verkeer op een autosnelweg). Ook het verlenen van een wetenschappelijke en maatschappelijke bijdrage is een grote stimulans om er mee bezig te zijn.

Structuur van deze thesis

Deze thesis bestaat uit vijf delen. In het eerste deel worden de broodnodige grondbeginselen van verkeersstromen uitgebreid geïntroduceerd. Enerzijds worden de verschillende meettechnieken en de karakteristieken van verkeersstromen besproken, anderzijds wordt een volledige behandeling van de verschillende modellen van verkeersstromen en bestuurdersgedrag gegeven. Aansluitend wordt ook de werking van de verschillende types simulators behandeld. Het begrijpen van dit deel is een fundamentele noodzaak om verder te gaan : de gebruikte terminologie, begrippen (en hun verklaringen) worden verderop continu gebruikt en het is dan ook van belang de context te kennen waarin ze gelden.

In het tweede deel wordt een wetenschappelijke afbakening gemaakt. Deze bestaat uit twee delen : het te bestuderen probleem wordt zo nauwkeurig mogelijk omschreven waarna er verschillende oplossingsmethodes worden bestudeerd. In dit hoofdstuk worden er een aantal gemaakte keuzes toegelicht en een wiskundig model uitgewerkt dat dan de basis zal vormen voor de microscopische verkeerssimulator *Mitrasim 2000*.

In het derde deel worden dan experimenten uitgevoerd, gebaseerd op een empirische methode. Eerst worden de gegevens toegelicht waar de simulator mee zal werken, vervolgens wordt het gebruikte wiskundig model gevalideerd en ten slotte worden diverse hypothesen voorgesteld, elk met een begeleidend experiment waarvan de resultaten telkens besproken worden.

In het voorlaatste deel wordt een nabespreking gegeven, de tekortkomingen van het gebruikte model worden toegelicht waarna de maatschappelijke bijdrage van deze thesis wordt besproken om tot slot planningen op korte en lange termijn te schetsen.

Het vijfde en laatste deel bevat de appendices. Hierin wordt de lijst van gebruikte afkortingen gegeven, er wordt uitgebreider ingegaan op de fundamentele vergelijking, er zijn diverse tabellen met waarden voor de simulatieparameters terug te vinden en er wordt ingegaan op de software die in het *Mitrasim 2000* pakket zit.

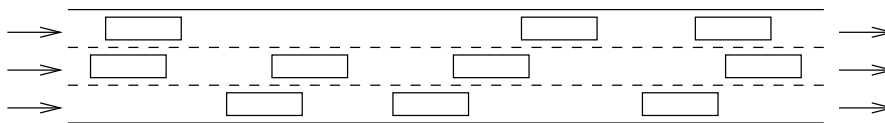
Deel I

De grondbeginselen

Een illustratief voorbeeld

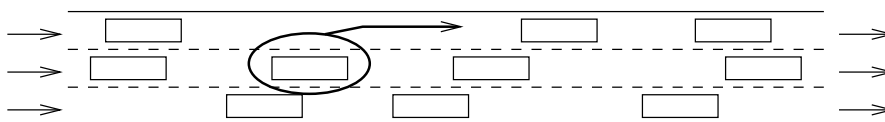
Alvorens wordt ingegaan op het uitvoeren van de experimenten in deze thesis is het noodzakelijk om te begrijpen hoe opstoppingen kunnen ontstaan. Het is daarom interessant eens te kijken naar volgend voorbeeld [Ker99] dat een gemakkelijk interpreteerbare versie geeft van filevorming :

Beschouw op een autosnelweg een gedeelte van een rijstrook met drie vakken. Hierop rijden voertuigen met elk een eigen snelheid (zie figuur 1), ze behouden een veilige afstand met hun voorliggers (er is geen druk verkeer) :



Figuur 1: Rustig rijden op een autosnelweg.

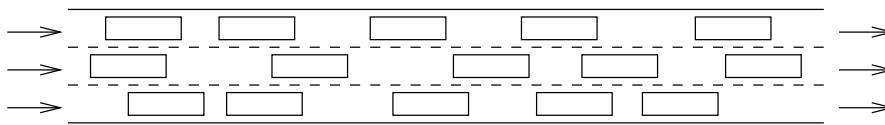
Men zegt dat de verkeersstroom zich in een toestand van *vrij verkeer* bevindt. Indien een voertuig sneller wil rijden dan kan het eenvoudigweg van vak veranderen en zijn voorligger inhalen. Dit kan op een veilige manier gebeuren (zie figuur 2) :



Figuur 2: Inhalen kan veilig gebeuren.

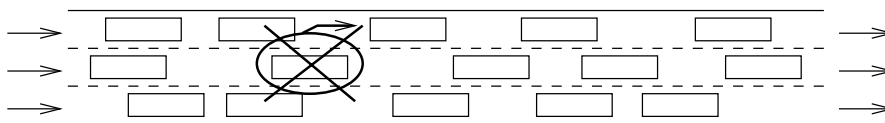
Wat zijn nu de gevolgen als het drukker wordt op de autosnelweg (zie figuur 3) ?

Het blijkt dat de mogelijkheid om veilig in te halen met deze verkeersdrukte niet meer bestaat. Bestuurders hebben het gevoel dat het



Figuur 3: Druk verkeer.

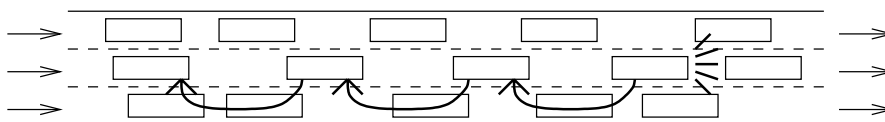
inhalen van een ander voertuig een groot risico met zich meebrengt waardoor ze veel meer terughoudend zijn (figuur 4 illustreert dit).



Figuur 4: Inhalen is veel te riskant.

Het verkeer is zo georganiseerd dat de voertuigen in groepjes rijden en per groepje hebben ze ongeveer dezelfde snelheid in een vak. De bestuurders merken dat men in andere vakken sneller rijdt en dus zullen ze proberen om in een ‘sneller’ vak te geraken zodat ze zelf sneller kunnen rijden. Door dit te doen zullen ze echter de verkeersdrukte in die vakken ook laten toenemen met als gevolg dat de gemiddelde snelheid daar zal afnemen. Het resultaat is dat alle vakken met elkaar gesynchroniseerd zijn en de verkeersstroom komt in een andere toestand : *gesynchroniseerd verkeer*. In deze toestand kan het verkeer op een autosnelweg nog vrij vlot rijden, zij het met een lagere gemiddelde snelheid (bijvoorbeeld 70 km/u in plaats van 120 km/u).

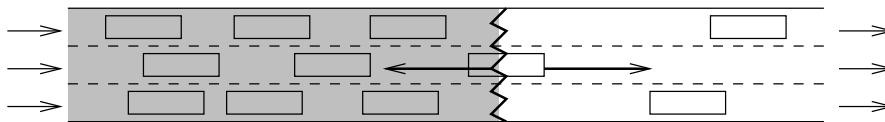
In dit gesynchroniseerd verkeer kan een nieuwe toestand ontstaan : *opgestopt verkeer*. Dit komt door het volgende feit : gesynchroniseerd verkeer is redelijk druk en als een bestuurder een beetje sneller wil rijden dan zal hij op zijn voorligger naderen. Doordat de afstand tussen beiden drastisch kleiner wordt – kleiner dan veilig is – zal de bestuurder uiteindelijk moeten remmen waardoor de bestuurder van het voertuig achter hem ook zal moeten remmen, enz. Er ontstaat een golf van remmende voertuigen (zie figuur 5) :



Figuur 5: Een golf van remmende voertuigen.

In deze golf dienen de voertuigen met toenemende kracht te remmen. Vermits nu elke bestuurder reageert op het gedrag van zijn voorligger kan dit uiteindelijk leiden tot voertuigen die volledig moeten stoppen (ze moeten misschien niet lang stilstaan maar ze moeten wel stoppen, anders gebeurt er een botsing). Dit kan dan weer als gevolg hebben dat voertuigen naar een vak gaan waar het verkeer nog rijdt, maar door dit te doen verhogen ze de drukte in dat vak zodat in alle vakken van de autosnelweg een opgestopte toestand optreedt.

Voertuigen die zich in dit opgestopt gedeelte van de autosnelweg bevinden, moeten wachten tot hun voorliggers dit gedeelte verlaten hebben. Het effect hiervan is dat er een golf van vertrekkende voertuigen tegen de rijrichting in propageert. Het blijkt nu dat als men het punt van gestopte en juist vertrokken voertuigen beschouwt, dit zich tegen de richting in beweegt met een constante snelheid van ongeveer 15 km/u (zie figuur 6). Dit laatste is empirisch aangetoond maar nog niet bewezen [Ker99].



Figuur 6: Een golf van stoppende en vertrekkende voertuigen.

De snelheid waarmee deze golf propageert is dezelfde als die waarmee de voertuigen het opgestopte deel van de verkeersstroom verlaten. In werkelijkheid zullen er vele van deze golven zich in een verkeersstroom manifesteren.

In de volgende hoofdstukken wordt er nu dieper ingegaan op deze materie, maar dan bekeken vanuit empirische en wiskundige standpunten. Verschillende meettechnieken om gegevens over verkeersstromen te verzamelen worden bestudeerd, de belangrijkste karakteristieken van verkeersstromen worden behandeld, diverse modellen om het verkeer te beschrijven worden onder de loep genomen, het rijgedrag van bestuurders komt uitgebreid ter sprake en tot slot wordt een bespreking gegeven van de manier waarop simulators werken.

Hoofdstuk 1

Inleidende begrippen

Inleiding

Dit hoofdstuk heeft als doelstelling de lezer vertrouwd te maken met de gehanteerde begrippen op het gebied van verkeersstromen. Er wordt aandacht besteed aan de verschillende meettechnieken om gegevens te vergaren en de algemene kenmerken van verkeersstromen worden besproken. De basis voor dit materiaal komt uit [Kou99b] en [Hal96].

1.1 Meettechnieken

Het verband tussen theorie en metingen is belangrijk omdat de theorie meestal van deze laatste afhangt. Heel het onderzoek naar de structuur van verkeersstromen is gebaseerd op empirische studies uitgevoerd aan autosnelwegen (dus ononderbroken verkeersstromen). Dit houdt in dat men eerst metingen deed en vervolgens keek naar de mogelijke correlaties tussen de verschillende meetgegevens. Vanuit dit perspectief is het nodig om eerst te kijken naar de diverse manieren waarop de verschillende parameters gemeten worden alvorens in te gaan op de verschillende karakteristieken van verkeersstromen.

Volgende zaken zijn van belang in de theorie over verkeersstromen :

doorstromingsgraad (*flow rate*) : het aantal voertuigen dat per tijdseenheid een bepaald punt passeert (zie paragraaf 1.2.1 voor meer details),

snelheid : de afstand die per tijdseenheid wordt afgelegd (zie paragraaf 1.2.2 voor meer details),

reistijd : de tijd nodig om een vastgestelde afstand af te leggen,

bezetting : het percentage van de tijd dat een punt op de rijbaan wordt bezet door voertuigen (zie paragraaf 1.2.3 voor meer details),

dichtheid : het aantal voertuigen per lengte-eenheid (zie paragraaf 1.2.4 voor meer details),

tussentijd : het tijdsinterval dat verstrijkt tussen het passeren van twee opeenvolgende voertuigen,

tussenruimte : de afstand tussen twee opeenvolgende voertuigen en

concentratie : een maat gemeten aan de hand van de bezetting of de dichtheid (zie paragraaf 1.2.4 voor meer details).

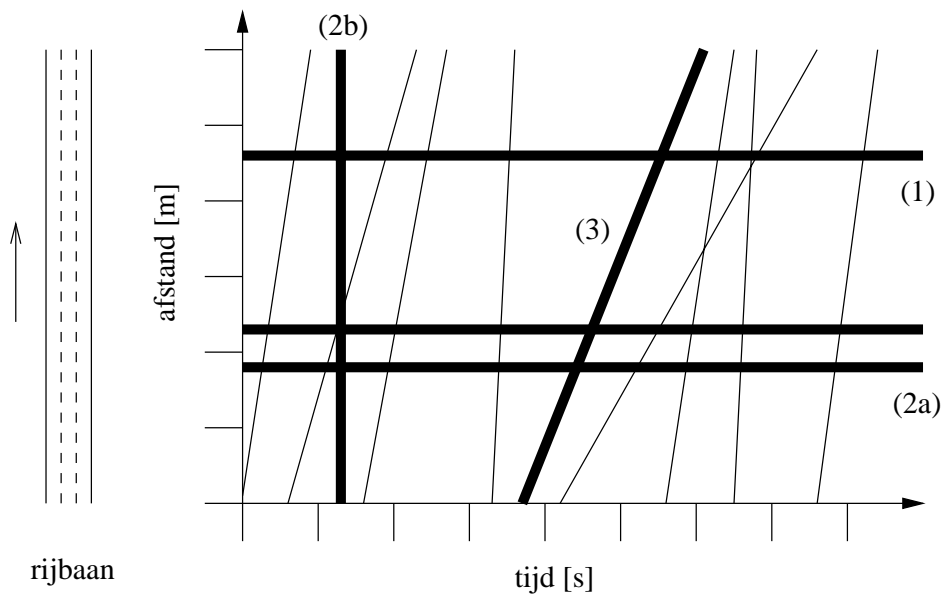
Voor het moment zal de intuïtieve betekenis van deze begrippen volstaan om hun metingen te bespreken. Meer precieze definities worden gegeven in paragraaf 1.2.

Volgende meettechnieken worden toegelicht :

- metingen in een punt,
- metingen over een deel van de rijbaan,
- metingen uitgevoerd door een bewegende waarnemer en
- metingen met behulp van externe communicatie.

Er wordt voor elke methode besproken welke karakteristieken die methode precies kan bepalen en welke enkel geschat kunnen worden. Deze meettechnieken worden geïllustreerd aan de hand van het *tijd-ruimte diagram* in figuur 1.1. Hierin stelt de verticale as de afstand voor vanaf een willekeurig startpunt op de rijbaan, in de richting van het verkeer. De horizontale as stelt de reeds verlopen tijd voor sinds een willekeurig beginpunt in de tijd. Elke lijn in de figuur stelt het traject van een willekeurig voertuig voor wanneer het voertuig zich over de rijbaan beweegt met het verlopen van de tijd. De helling van zo'n lijn stelt de snelheid van het voertuig voor. Als twee lijnen elkaar snijden dan wil dit zeggen dat er op dat punt een voertuig een ander voertuig inhaalt (let wel, twee of meer voertuigen kunnen zich natuurlijk nooit op hetzelfde punt in ruimte en tijd bevinden).

In dit diagram kunnen de verschillende meettechnieken als volgt teruggevonden worden :



Figuur 1.1: Het tijd-ruimte diagram voor metingen.

- een meting in een punt, (1) in figuur 1.1, wordt voorgesteld door een horizontale rechte die de trajectlijnen van de voertuigen snijdt (de plaats is er constant maar de tijd varieert).
- Een meting over een deel van de rijbaan wordt opgesplitst in enerzijds een meting over een klein deel van de rijbaan, (2a) in figuur 1.1 wat wordt voorgesteld door twee dicht bij elkaar evenwijdige horizontale rechten en anderzijds een meting over een groot deel van de rijbaan, (2b) in figuur 1.1 wat wordt voorgesteld door een verticale lijn (de tijd is er constant terwijl de plaats varieert).
- Een meting uitgevoerd door een bewegende waarnemer, (3) in figuur 1.1, wordt voorgesteld door een trajectlijn.
- Een meting met behulp van externe communicatie wordt *niet* voorgesteld in figuur 1.1.

Er wordt nu dieper ingegaan op elk van deze meettechnieken.

1.1.1 Metingen in een punt

Deze soort van metingen was de eerste die gebruikt werd om gegevens over het verkeer te verkrijgen. Ze is zeer handig om voertuigtellingen te doen en bijgevolg

kan ze ook gebruikt worden om doorstromingsgraden direct te berekenen. Met enige zorg is het ook mogelijk om tussentijden af te leiden.

De technologie om deze puntmetingen te verrichten is de laatste 30 jaar sterk geëvolueerd. Vroeger ging men met behulp van handtellers te werk, tegenwoordig zijn de meest gangbare detectoren gebaseerd op inductieve lus-technologie, radars, microgolven, fotocellen en zelfs camera's. Eén van de meest recente technologieën is het gebruik van computers bij het analyseren van videobeelden : men laat een camera gedurende enige tijd een bepaald stuk van de rijbaan filmen en voedt deze film dan aan een computerprogramma [CHC98]. Zo'n programma kan variaties in contrast herkennen tussen de voertuigen en het wegdek waardoor de tellingen automatisch¹ kunnen gebeuren (het is zelfs mogelijk om voertuigen te 'volgen'). Een voorbeeld van zo'n programma is *ViVA Traffic Analysis Software*, ontwikkeld door het departement van Transport aan de Universiteit Kaiserslautern te Duitsland.

Het tijd-ruimte diagram uit figuur 1.1 beschouwend, ziet men dat bij (1) de lokatie (afstand) constant blijft. De meting gebeurt hier in de tijd en elk voertuig zal op een bepaald tijdstip de detector passeren zodat het geteld kan worden.

Indien een voertuig *niet gestopt* is, kunnen snelheden *in een punt* enkel gemeten worden met behulp van radar- of microgolfdetectoren. De snelheid waaraan deze metingen gedaan worden is zo hoog dat een voertuig slechts enkele centimeters moet bewegen om zijn snelheid vast te stellen. Indien deze instrumenten niet voorhanden zijn, is een tweede observatieplaats nodig om de snelheden te meten (zie paragraaf 1.1.2 voor meer uitleg). Dichtheid, gedefinieerd als het aantal voertuigen per lengte-eenheid, heeft geen zin voor een puntmeting aangezien er geen lengte bij betrokken is. Men kan wel aan de hand van een aantal puntmetingen de dichtheid berekenen als de snelheid bekend is, maar dan moet men de betekenis van zo'n meting in vraag stellen, aangezien het weerom de dichtheid in een punt betreft.

Conclusie : enkel voertuigtellingen (cfr. doorstromingsgraden), tussentijden en snelheden kunnen direct gemeten worden met behulp van metingen in een punt. Bezetting kan niet op deze manier gemeten worden aangezien de apparaten daarvoor in werkelijkheid een klein stukje ruimte van de rijbaan nodig hebben.

¹Op de meeste autosnelwegen in België liggen lusdetectoren en op bepaalde plaatsen staan zelfs camera's waarvan de beelden door het LIN (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap) met computers verwerkt worden.

1.1.2 Metingen over een deel van de rijbaan

Metingen over een klein deel van de rijbaan

Indien men vroeger snelheden wou bepalen, plaatste men een tweede lusdetector dicht bij de eerste. De meer recente systemen maken gebruik van een paar aanwezigheidsdetectoren, bijvoorbeeld inductieve lussen die vijf tot zes meter (korte afstand !) van elkaar verwijderd liggen. Ook met behulp van videocamera-technologie is het zo mogelijk om snelheden te meten. Men moet nu wel beseffen dat er geen puntmetingen meer worden gedaan maar metingen over een klein gedeelte van de rijbaan. Met deze meettechniek kunnen doorstromingsgraden, tussentijden en zelfs snelheden gemeten worden.

In het tijd-ruimte diagram uit figuur 1.1 kan men zien dat bij (2a) er twee metingen gedaan worden op een kleine afstand van elkaar. Voor elke meting is zoals bij puntmetingen de lokatie (afstand) constant en gebeurt ze in de tijd. Elk voertuig zal nu beide detectoren passeren en informatie opleveren.

De meeste huidige puntdetectoren nemen een plaats in op de rijbaan en bijgevolg meten ze dus ook over een klein deel van de rijbaan. Deze detectoren leveren een nieuwe grootheid op : bezetting. Deze werd eerder al gedefinieerd als *het percentage van de tijd dat de detectiezone van het instrument bezet is door een voertuig* en men kan deze grootheid meten omdat de detectoren continu werken (met een frequentie van ongeveer 50 Hz). Merk op : de meting is afhankelijk van de grootte van de detectiezone.

Metingen over een groot deel van de rijbaan

Net zoals puntmetingen laten ook metingen over een klein deel van de rijbaan niet toe om de dichtheid te berekenen. Indien we echter gegevens kunnen verkrijgen over een groter deel van de rijbaan dan kan de dichtheid wel berekend worden. Een uitstekend middel hiertoe zijn videocamera's die op hoge gebouwen gemonteerd staan en zo bijvoorbeeld een halve kilometer van de rijbaan beschouwen. Nu kan op basis van een enkel videobeeld enkel de dichtheid gemeten worden. Aangezien zoals in (2b) in het tijd-ruimte diagram uit figuur 1.1 de tijd nu constant is, kan geen meting gedaan worden van voertuigtellingen of snelheden. Er wordt immers een meting gedaan op een moment in de tijd waarbij men een volledig stuk van de rijbaan beschouwt.

Indien er beschikking is over meerdere beelden (telkens een klein tijdsinterval van elkaar gescheiden) dan kunnen de snelheden wel gemeten worden, meestal over een afstand die de gehele lengte van het rijbaangedeelte benadert. Merk op

dat er een verandering van meetbasis optreedt : daar waar men bij het meten van de dichtheid een meting verricht op een enkel punt in de tijd, zal men bij het meten van snelheden een variatie over tijd en afstand nodig hebben. Doorstromingsgraden en dichtheden refereren naar verschillende kaders waarin de metingen gebeuren : de eerste refereren naar tijd op een punt in de ruimte terwijl de tweede refereren naar een plaats op een punt in de tijd.

Een extra voordeel is dat ook reistijden berekend kunnen worden met behulp van deze methode. De techniek hiervoor staat echter nog niet volledig op punt en het is wachten op betere computeralgoritmes voor beeldherkenning.

Conclusie : het grote voordeel van deze methode is dat, naast de doorstromingsgraad, snelheid en tussentijd, nu ook de dichtheid gemeten kan worden wat bij de puntmetingen niet het geval was. Gebruik van de eerste methode (klein deel) of de tweede methode (groot deel) is afhankelijk van welke informatie verkregen dient te worden.

1.1.3 Metingen uitgevoerd door een bewegende waarnemer

Deze methode werkt met een bewegend referentiekader : een voertuig verplaatst zich nu in de verkeersstroom zelf en verzamelt allerlei data zoals snelheden en reistijden in functie van de tijd en de plaats op de rijbaan. Het grote voordeel is dat nu kwalitatieve informatie over het wegverkeer bekomen kan worden zonder dat er uitgebreide apparatuur aan te pas komt.

Bij (3) in het tijd-ruimte diagram uit figuur 1.1 is te zien dat de meting zich zowel in de tijd als in de ruimte uitstrekt (er is nu sprake van een trajectlijn van het meetvoertuig).

Wardrop en Charlesworth ontwikkelden een andere manier om dergelijke metingen te verrichten [WC54]. Ze is hoofdzakelijk geschikt voor stadsverkeer en heeft als doel metingen te doen van zowel snelheden als voertuigtellingen tegelijk. De basis is een voertuig dat zich in beide rijrichtingen verplaatst. Met behulp van volgende vergelijkingen kunnen dan snelheden en doorstromingsgraden voor een gekozen rijrichting geschat worden :

$$q = \frac{x + y}{t_a + t_w} \quad (1.1)$$

$$\bar{t} = t_w - \frac{y}{q}, \quad (1.2)$$

met

- q : de geschatte doorstromingsgraad op de rijbaan in de gewenste rijrichting,
- x : het aantal voertuigen, zich in de gewenste rijrichting verplaatsend, dat het onderzoeksvoertuig tegenkomt terwijl ze zich verplaatsten in de tegengestelde rijrichting,
- y : het netto-aantal voertuigen dat het onderzoeksvoertuig inhaalt terwijl ze zich in de gewenste rijrichting verplaatsten (i.e. degenen die passeren min degenen die ingehaald worden),
- t_a : de tijd nodig om de reis tegen de verkeersstroom in te maken,
- t_w : de tijd nodig om de reis met de verkeersstroom mee te maken en
- \bar{t} : de geschatte gemiddelde reistijd in de gewenste rijrichting.

Het gebruik van deze methode is evenwel niet zonder problemen. Wright herbekeek de theorie achter deze methode en vond dat de methode meestal lichtjes afwijkende resultaten gaf ([Hal96], paragraaf 2.1.4). Hij vond ook dat de methode enkel nuttig kan gebruikt worden op gewone stukken rijbaan zonder op- of afritten en dat er een groot aantal metingen gedaan moet worden om betrouwbare gegevens te verkrijgen.

Conclusie : de toepassing van deze methode is sterk beperkt en wordt daarom ook niet veelvuldig gebruikt, al kan ze wel informatie over het gedrag van een verkeersstroom opleveren.

1.1.4 Metingen met behulp van externe communicatie

In sommige vormen van Intelligente Transport Systemen wordt er gebruik gemaakt van communicatie tussen speciaal uitgeruste voertuigen en een centraal systeem. Op deze manier kan informatie met betrekking tot de snelheid doorgestuurd worden naar het centrale systeem. Het is ook mogelijk om voertuigen te volgen zodat er informatie over de reistijden kan bekomen worden. Door gebruik te maken van verschillende technieken is het mogelijk om de drie voorgaande meettechnieken na te bootsen. Een voordeel van deze methode is dat de herstellen en onderhoudskosten nu sterk beperkt blijven. Een nadeel is de beperking dat men enkel informatie over snelheden kan bekomen. Het is algemeen gezien niet mogelijk om met behulp van slechts één voertuig grootheden zoals dichtheid en doorstromingsgraden te meten met een zinvolle betekenis eraan gekoppeld.

Conclusie : snelheden kunnen nu perfect bepaald worden en de methode is zeer handig voor het bepalen van reistijden. Andere grootheden zijn echter quasi-onmeetbaar.

1.2 Karakteristieken van verkeersstromen

Algemeen beschouwd kunnen we stellen dat verkeersstromen niet uniform van aard zijn ; ze veranderen in tijd en ruimte. Door dit feit is het meten van de gewenste grootheden eigenlijk het beschouwen van stochastische veranderlijken. In realiteit blijkt dat karakteristieken zoals doorstromingsgraad, snelheid en concentratie eigenlijk parameters van statistische verdelingen zijn.

1.2.1 Doorstromingsgraad (*flow rate*)

Deze grootheid kan rechtstreeks gemeten worden met behulp van puntmetingen (zie paragraaf 1.1.1) en per definitie omvatten deze een meting in de tijd. Ze kunnen niet geschat worden met behulp van één enkel beeld van een rijbaan. De doorstromingsgraad q is het aantal getelde voertuigen N , gedeeld door de verstreken tijd T :

$$q = \frac{N}{T}. \quad (1.3)$$

De totaal verstreken studietijd is de som van alle tussentijden gemeten voor elk voertuig (dit wil zeggen : het tijdsverschil tussen het huidige voertuig en zijn directe voorligger) :

$$T = \sum_{i=1}^N h_i. \quad (1.4)$$

Als we deze som nu substitueren in vergelijking 1.3 en we werken uit, dan verschijnt er :

$$q = \frac{N}{T} = \frac{N}{\sum_i^N h_i} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_i^N h_i} = \frac{1}{\bar{h}}. \quad (1.5)$$

De doorstromingsgraad en de gemiddelde tussentijd hebben dus een reciproke relatie. Doorstromingsgraden worden meestal uitgedrukt in *aantal voertuigen per uur*, al kan het gemeten tijdsinterval veel korter zijn.

Er werd door de verkeertheoretici wel kritiek uitgeoefend over het toepassen van deze vergelijkingen bij het meten van grote verkeersdruktes in een zeer kort tijdsinterval (bijvoorbeeld 30 seconden tot 1 minuut). De bekomen resultaten kunnen immers variëren wanneer verschillende tijdsintervallen worden gebruikt [RK57].

Volgens de in 1985 verschenen *Highway Capacity Manual* (HCM) is het aangewezen om in praktijk met intervallen van tenminste 15 minuten te werken ([Hal96], paragraaf 2.2.1).

1.2.2 Snelheid

Het meten van de snelheid van een enkel voertuig vereist een meting in zowel ruimte als tijd. De ogenblikkelijke snelheid v_i van een individueel voertuig wordt gedefinieerd als :

$$v_i = \frac{dx}{dt} = \lim_{(t_2-t_1) \rightarrow 0} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \quad (1.6)$$

Merk op dat in vergelijking 1.6 de breuk eigenlijk de richtingscoëfficiënt is van een trajectlijn in figuur 1.1.

Er blijkt dat het mogelijk is om met behulp van radar en microgolven snelheidsmetingen te doen die het dichtst aanleunen bij definitie 1.6. Maar zelfs deze meettechnieken beroepen zich op de beweging van het voertuig in kwestie, wat wil zeggen dat ze meten over een eindige afstand in ruimte en tijd, hoe klein die ook mag zijn. Snelheden worden gemeten over een korte afstand (zie paragraaf 1.1.2) en dit brengt met zich mee dat eigenlijk niet de ogenblikkelijke snelheid wordt gemeten maar een (goede) benadering ervan.

In de literatuur wordt er dikwijls onderscheid gemaakt tussen de verschillende manieren waarop de gemiddelde snelheid van een reeks voertuigen kan berekend worden. Volgend populair vraagstuk illustreert de verschillende resultaten die dit met zich mee kan brengen :

Stel, een reiziger beweegt zich van punt A naar punt B (de afstand tussen A en B bedraagt 20 km) en terug. Hij gaat van A naar B met een gemiddelde snelheid van 80 km/u en van B naar A met een gemiddelde snelheid van 40 km/u. Wat is zijn gemiddelde snelheid voor de hele trip ?

Het antwoord hierop is voor interpretatie vatbaar. Wat wordt bedoeld met de term *gemiddelde snelheid* ? Als men met een radarpistool aan de rand van de weg tussen A en B staat, de snelheid van de reiziger meet van A naar B en terug, de metingen vervolgens *rekenkundig* uitmiddelt, dan bekomt men $(80 \text{ km/u} + 40 \text{ km/u}) \div 2 = 60 \text{ km/u}$. Men kan het vraagstuk echter op een meer correcte manier oplossen : het duurt een kwartier om van A naar B te gaan en een half uur om van B naar A te

gaan. In totaal duurt het dus drie kwartier om een afstand van 40 km af te leggen. De gemiddelde snelheid is dus $(40 \text{ km}/45 \text{ minuten}) \cdot 60 \text{ minuten} = 53,3 \text{ km/u}$! Vandaar volgende definities.

Snelheid uitgemiddeld in de tijd (TMS : *time mean speed*)

De TMS \overline{v}_t is het rekenkundig gemiddelde van de observaties :

$$\overline{v}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i. \quad (1.7)$$

Het betreft dus een gemiddelde van observaties genomen in de tijd.

Snelheid uitgemiddeld in de ruimte (SMS : *space mean speed*)

De SMS \overline{v}_s is niet zo eenduidig gedefinieerd als de TMS, er bestaat een variëteit aan definities die niet allen equivalent zijn. Nochtans blijken er twee hoofdcategorieën van definities te bestaan. Een voorbeeld van een definitie uit de eerste hoofdcategorie is de volgende waarin de snelheid gebaseerd is op de gemiddelde tijd nodig om een gespecificeerde afstand D af te leggen :

$$\overline{v}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_i t_i}. \quad (1.8)$$

Hierin is t_i de tijd die voertuig i nodig heeft om de afstand D af te leggen :

$$t_i = \frac{D}{v_i}. \quad (1.9)$$

Een vraag die men zich bij vergelijking 1.8 kan stellen is waarover de sommatie juist wordt genomen ? Impliciet is dit over alle voertuigen die de afstand D volledig afgelegd hebben. Echter, in het geval het een drukke verkeerssituatie betreft zullen er altijd voertuigen zijn die de afstand D nog niet volledig afgelegd hebben. Vandaar dat de beschouwde verzameling voertuigen eigenlijk willekeurig moet genomen worden.

Een andere definitie voor SMS is de volgende : SMS is het totale verkeer gedeeld door de totale reistijd. Dit komt overeen met (2a) in het tijd-ruimte diagram uit figuur 1.1 waarin een kleine rechthoek gespecificeerd wordt (met behulp van de twee horizontale rechten) en waarbij alle verkeer dat in die rechthoek voorkomt

in rekening wordt gebracht. Deze definitie is enerzijds gelijkaardig aan vergelijking 1.8 (het meten van snelheden gebeurt over een afstand), maar anderzijds verschilt ze ermee (nu worden voertuigen die nog niet de volledige afstand D hebben afgelegd ook mee in rekening gebracht).

Vergelijking 1.8 kan met behulp van vergelijking 1.9 nog herschreven worden als een harmonisch gemiddelde van snelheden van individuele voertuigen :

$$\bar{v}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_i t_i} = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_i \frac{D}{v_i}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_i}}. \quad (1.10)$$

Het probleem met deze definitie is dat de meting over een zekere afstand D niet meer expliciet is. Het lijkt alsof dat SMS berekend kan worden door het harmonisch gemiddelde in de tijd te nemen van alle snelheden gemeten in een punt. In het geval de snelheden onveranderd blijven op de plaats waar de meting gebeurt dan is dit in orde. Als de snelheden echter variëren met de lengte van rijbaan (dus met de afstand D) dan zal er een verschil zijn tussen het harmonisch gemiddelde van snelheden op een punt in de ruimte en de snelheid gebaseerd op de gemiddelde reistijd voor de lengte van de rijbaan.

De tweede hoofdcategorie van definities voor SMS baseert zich op het nemen van het gemiddelde van de snelheden van alle voertuigen op een gedeelte van de rijbaan en dit op één moment in de tijd. Dit is het best verstaanbaar met behulp van een luchtfoto van het gedeelte van de rijbaan, in de veronderstelling dat van elk voertuig de snelheid op de een of andere manier af te lezen is. In het tijd-ruimte diagram uit figuur 1.1 is dit te zien aan de verticale rechte (2b). Men kan ook twee kort na elkaar genomen luchtfoto's beschouwen zodat de snelheden afgeleid kunnen worden voor de eerste luchtfoto.

Algemeen wordt aanvaard dat ongeacht welke definitie ook gebruikt wordt voor SMS, men beter SMS kan meten dan TMS voor het in praktijk berekenen van theoretisch juiste gemiddelde snelheden.

Opmerking : het is van belang dat er een onderscheid wordt gemaakt tussen TMS en SMS bij opgestopt verkeer op een rijbaan. Voor vrij verkeer is het verschil tussen beiden echter niet significant. Men kan aantonen dat volgende betrekking geldt tussen TMS en SMS :

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \frac{\sigma_s^2}{\bar{v}_s}, \quad (1.11)$$

met

$$\sigma_s^2 = \frac{\sum_i k_i (v_i - \bar{v}_s)^2}{K} \quad (1.12)$$

en met

k_i : de dichtheid van de deelstroom I ,

K : de dichtheid van de totale stroom.

Wanneer er een grote variabiliteit tussen de snelheden is (bijvoorbeeld bij de overgang van vrij verkeer naar opgestopt verkeer), dan zal er een aanzienlijk verschil tussen TMS en SMS zijn.

Indien men vrij verkeer beschouwt dan zal het verschil tussen beiden vrij klein zijn. De meeste voertuigen bewegen met ongeveer gelijke snelheden waardoor σ_s^2 klein is terwijl \bar{v}_s relatief groot is. Dus praktisch gezien zullen in deze situatie beide gemiddeldes gelijk genomen worden, al is het wel aangeraden om te vermelden welk gemiddelde berekend werd en hoeveel beide gemiddeldes van elkaar afwijken.

1.2.3 Bezetting

Bezetting (*occupancy*) is de fractie van tijd dat voertuigen over een detector gaan. Voor een specifiek tijdsinterval T is dit de som van de tijden dat voertuigen de detector passeren, gedeeld door T . Voor elk individueel voertuig wordt de tijd gependend tijdens het over de detector gaan, bepaald door de snelheid v_i en de lengte L_i van het voertuig, plus de lengte d van de detector zelf. Dit wil eigenlijk zeggen dat de detector bezig is met een voertuig van het moment dat de voorbumper van het voertuig het begin van de detectiezone overschrijdt tot het moment dat de achterbumper van het voertuig het einde van de detectiezone verlaat. De volgende vergelijkingen zijn gebaseerd op [Ath65] en hebben als doel de snelheden van voertuigen te berekenen aan de hand van de bezetting en de doorstromingsgraad :

$$\begin{aligned} \text{bezetting} &= \frac{\sum_i \frac{L_i+d}{v_i}}{T} \\ &= \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + \frac{d}{T} \sum_i \frac{1}{v_i}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Als we de tweede term van de laatste vergelijking vermenigvuldigen met $N(1/N)$ en we vergelijkingen 1.3 en 1.10 substitueren dan krijgen we :

$$\begin{aligned}
\text{bezetting} &= \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + d \cdot \frac{N}{T} \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_i} \\
&= \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + d \cdot \frac{q}{v_s}.
\end{aligned} \tag{1.14}$$

Als we ervan uitgaan dat volgende vergelijking geldig is (zie paragraaf 1.2.4) :

$$q = k \cdot \overline{v_s} \tag{1.15}$$

dan wordt de bezetting :

$$\text{bezetting} = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + d \cdot k. \tag{1.16}$$

Merk op dat T gewoon de som van alle tussentijden is. Dus substitueren we T door deze som en vermenigvuldigen teller en noemer met $1/N$:

$$\begin{aligned}
\text{bezetting} &= \frac{\sum_i \frac{L_i}{v_i}}{T} + d \cdot k \\
&= \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_i}}{\frac{1}{N} \sum_i h_i} + d \cdot k \\
&= \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_i}}{\overline{h}} + d \cdot k.
\end{aligned} \tag{1.17}$$

Als we nu aannemen dat alle voertuigen dezelfde uniforme lengte L hebben, dan kunnen we nog verder vereenvoudigen tot :

$$\begin{aligned}
\text{bezetting} &= \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_i}}{\overline{h}} + d \cdot k \\
&= \frac{1}{\overline{h}} \cdot L \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_i} + d \cdot k \\
&= L \cdot \frac{q}{v_s} + d \cdot k \\
&= (L + d)k \\
&= c_k k,
\end{aligned} \tag{1.18}$$

waarbij c_k een evenredigheidsconstante is in de relatie tussen bezetting en dichtheid (op eenzelfde detector-plaats is d constant).

De snelheden kunnen dus als volgt berekend worden :

$$\overline{v_s} = \frac{q \cdot c_k}{\text{bezetting}}. \quad (1.19)$$

Merk op dat de resultaten in vergelijkingen 1.18 en 1.19 blijven gelden als de voertuiglengtes variëren en de snelheden constant blijven (op voorwaarde dat L dan wel geïnterpreteerd dient te worden als het gemiddelde van de voertuiglengtes).

Als zowel de voertuiglengtes als de snelheden variëren dan gelden vergelijkingen 1.18 en 1.19 niet meer en worden de relaties tussen snelheid, doorstromingsgraad en bezetting veel ingewikkelder.

1.2.4 Concentratie

Vroeger gebruikte men concentratie als synoniem voor dichtheid. Nu lijkt het echter meer aangewezen om concentratie een bredere betekenis te geven die zowel dichtheid als bezetting omvat. De eerste term is een concentratiemeting in de ruimte, de tweede term een concentratiemeting in de tijd van dezelfde stroom voertuigen.

Dichtheid kan enkel *gemeten* worden langs een lengte. Als er enkel puntmetingen beschikbaar zijn dan moet de dichtheid berekend worden aan de hand van ofwel bezetting ofwel snelheid en doorstromingsgraad. Verkeersdeskundigen *schatten* traditioneel concentratie met behulp van puntmetingen. Ze maken daarbij gebruik van volgende relatie :

$$k = \frac{q}{v_s}. \quad (1.20)$$

Deze vergelijking (de *fundamentele vergelijking* voor verkeersstromen) werd ook gebruikt in paragraaf 1.2.3 voor het afleiden van snelheden uit bezettingen en doorstromingsgraden. Het probleem bij het gebruik van vergelijking 1.20 om dichtheden te schatten is dat de vergelijking *enkel geldig is onder zeer strikte voorwaarden* (wanneer bijvoorbeeld zowel de ruimte- als tijdsmeetintervallen in de limiet nul worden). Als geen enkel van deze voorwaarden geldt dan kan het gebruik van vergelijking 1.20 misleidende resultaten geven die niet overeen zouden stemmen met de empirische metingen. Dit is een belangrijk punt omdat deze vergelijking vaak wordt toegepast in gevallen die haar geldigheid overschrijden. Een meer gedetailleerde uitleg van deze vergelijking is terug te vinden in appendix B.

1.3 Conclusies

In dit hoofdstuk werden verschillende meettechnieken om empirische data te bekomen gepresenteerd. De belangrijkste karakteristieken van verkeersstromen (zijnde doorstromingsgraad, snelheid, bezetting, dichtheid en concentratie) werden ook uitgebreid behandeld. In het volgende hoofdstuk wordt al deze kennis aangewend om de empirische verbanden tussen deze diverse karakteristieken te bestuderen wat aanleiding zal geven tot wiskundige modellen die de verkeersstromen beschrijven.

Hoofdstuk 2

Modellen van verkeersstromen

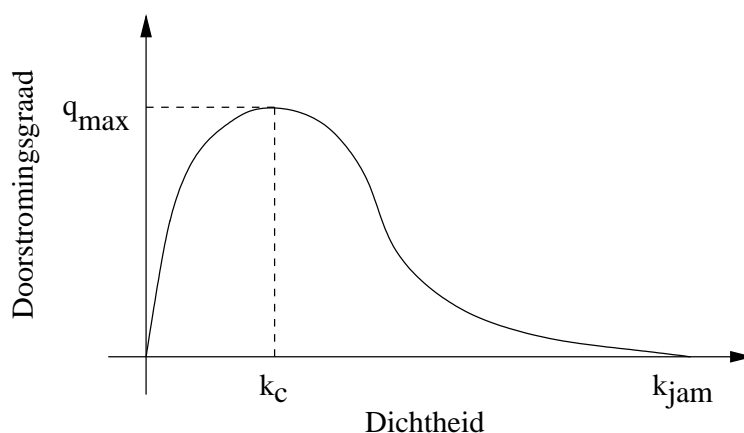
Inleiding

Nu de verschillende karakteristieken van verkeersstromen gekend zijn (zie paragraaf 1.2 voor een uitgebreide behandeling) is de volgende stap het bestuderen van hun onderlinge relaties. Dit geeft aanleiding tot de vorming van diverse soorten modellen voor het beschrijven van verkeersstromen. Deze modellen zijn al naargelang ze de verkeersstromen in hun geheel of als zijnde opgebouwd uit hun componenten beschouwen, macroscopisch of microscopisch van aard.

De in dit hoofdstuk besproken stroommodellen gaan een verkeersstroom als een geheel beschouwen, wat maakt dat ze allen macroscopisch van aard zijn. De manieren waarop deze stroommodellen worden geconstrueerd zijn zeer uiteenlopend : vertrekkende van zuiver empirische methodes wordt overgegaan op continue stroommodellen, macroscopische stroommodellen en tenslotte stroommodellen gebaseerd op wachtrij-theorie. Alvorens in te gaan op een bespreking van deze stroommodellen worden de mogelijke oorzaken van filevorming onder de loep genomen (dit deel is gebaseerd op [Has99]).

2.1 Oorzaken van filevorming

Filevorming is een alledaags fenomeen gedurende de piekuren, zelfs al gebeuren er geen ongevallen. Het fenomeen kan verklaard worden met behulp van de onderlinge relaties tussen de verschillende fundamentele grootheden : snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid. Doorstromingsgraad en dichtheid zijn met elkaar



Figuur 2.1: Het fundamenteel diagram van verkeertheorie.

gekoppeld zoals te zien is in figuur 2.1, wat ook wel gekend is als het *fundamenteel diagram van verkeertheorie*. De maximale capaciteit, q_{max} , is het maximaal aantal voertuigen dat over een deel van de rijbaan kan passeren. De dichtheid die hiermee overeenkomt is de kritieke dichtheid k_c .

De oppervlakte onder de grafiek kan in twee gebieden worden verdeeld. Het gebied links van de kritieke dichtheid, k_c , stelt het vrij verkeer voor (geen opstoppingen). Het gebied rechts ervan stelt het opgestopt verkeer voor. Het is een must om in het linker gebied te werken aangezien het verkeer dan nog vlot kan verlopen (men blijft onder de kritieke dichtheid) en niemand dus last van opstoppingen heeft. Merk nog op dat autosnelwegen het meest efficiënt worden benut bij de kritieke dichtheid k_c , wanneer de doorstromingsgraad een maximale waarde q_{max} bereikt.

In figuur 2.1 is ook te zien dat een toename in dichtheid boven de kritieke dichtheid leidt tot een overeenkomstige afname in doorstromingsgraad. Deze laatste wordt op een gegeven moment zelfs nul, namelijk wanneer $k = k_{jam}$ met k_{jam} de opstoppingsdichtheid (*jam density*), zijnde de dichtheid waarbij de maximale verkeersdruk is bereikt.

De traditionele manier van nieuwe autosnelwegen bouwen is een vrij dure zaak, verstorend voor het bestaande verkeer, belastend voor het milieu en beperkt door de schaarsheid aan beschikbare grond. Alternatieve oplossingen, gericht op het zo nuttig mogelijk gebruiken van de bestaande systemen, kregen de laatste decennia veel aandacht. Veel problemen kunnen opgelost worden door het rechtstreeks controleren van de verkeersstroom door gebruik te maken van diverse controlemiddelen. Deze gaan van middelen die de dichtheid beïnvloeden (zoals het plaatsen van verkeerslichten aan de oprit van autosnelwegen en het voor de opstopping om-

leiden van het verkeer) tot middelen die het fundamenteel diagram beïnvloeden (zoals variabele snelheidsbeperkingen en restricties op het gebruik van vakken).

De rest van dit hoofdstuk dient men met dit idee in het achterhoofd te beschouwen. De evolutie van de stroommodellen begon immers door studie van empirische data en een zo eenvoudig mogelijke beschrijving daarvan.

2.2 Empirische stroommodellen

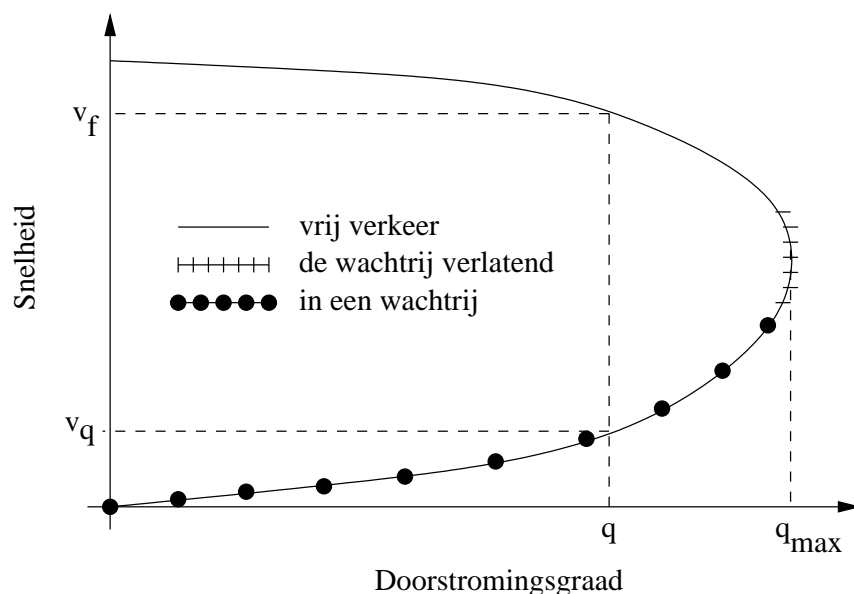
In dit gedeelte worden de inspanningen toegelicht die tot de eerste stroommodellen hebben geleid. Deze modellen vertrekken vanuit de veronderstelling dat er met een *ononderbroken* verkeersstroom wordt gewerkt (zoals autosnelwegen, ...). De onderlinge relaties tussen de grootheden uit paragraaf 1.2 worden besproken. Belangrijke factoren die men niet uit het oog mag verliezen zijn de gebruikte meettechnieken om de data te bekomen en de plaats waar deze data wordt bekomen. Vooral dit laatste is zeer belangrijk aangezien een meting verschillende resultaten kan geven al naargelang ze aan een oprit, een afrit of elders wordt gedaan.

De redenering achter deze modellen is dat men gelooft dat voertuigbestuurders, gemiddeld gezien, hetzelfde gedrag vertonen onder dezelfde gemiddelde condities [WV00]. De fundamentele vergelijking $k = \frac{q}{v_s}$ (zie appendix B voor meer details) verbindt de drie grootheden dichtheid k , doorstromingsgraad q en snelheid v_s met elkaar. Wanneer twee van deze variabelen gekend zijn kan de derde eruit berekend worden. Op basis van bekomen data en deze eenvoudige vergelijking kunnen diverse grafieken geconstrueerd worden die hierna uitgebreid behandeld worden. Het sleutelconcept dat in deze modellen constant gebruikt wordt, is het aanpassen van functies – gebaseerd op de fundamentele vergelijking – aan deze data zodat benaderingen gemaakt kunnen worden.

Dit deel is gebaseerd op [Kou99b] en [Hal96].

2.2.1 Snelheid-doorstromingsgraad modellen

Aan de bivariate relatie tussen snelheid en doorstromingsgraad wordt al geruime tijd gewerkt, het laatste decennium zelfs zeer intensief. Het belang ervan is dat men een beeld kan krijgen van het gedrag van het verkeer op een autosnelweg. De data zelf kan vrij gemakkelijk bekomen worden daar er overal langs de autosnelwegen camera's staan opgesteld. Grondige analyse van deze gegevens kan inzicht geven in de fileproblematiek. Er volgt nu eerst een empirische, daarna een theoretische bespreking.



Figuur 2.2: De basisgrafiek voor de snelheid-doorstromingsgraad relatie.

Empirische bespreking

Het grootste deel van het empirische werk over de relatie tussen snelheid en doorstromingsgraad werd verricht door Hall, Hurdle en Banks ([Hal96], paragraaf 2.3.2) en samengevat in een verhandeling waarin ze het model in figuur 2.2 voorstellen. Deze grafiek is de basis van de meeste snelheid-doorstromingsgraad grafieken. De grafiek stelt alle mogelijke combinaties van snelheid en doorstromingsgraad voor. Men kan zien dat er met elke snelheid juist één doorstromingsgraad overeenkomt, omgekeerd geldt deze relatie echter niet : met elke doorstromingsgraad worden twee snelheden geassocieerd, namelijk v_f (de snelheid in vrij verkeer) en v_q (de snelheid in opgestopt verkeer). Dit is intuïtief aan te voelen met volgend voorbeeld : stel dat $q = 3600$ voertuigen/uur, $v_f = 120$ km/u en $v_q = 60$ km/u. In het ene geval wil dit zeggen dat de snelheid hoog is en het niet druk is op de rijbaan, terwijl dit in het andere geval wil zeggen dat de snelheid laag is en het wel druk is op de rijbaan. Dus op de bovenste tak in de grafiek heerst er een lage verkeersdruk (en dus een lage dichtheid), op de onderste tak heerst er een hoge verkeersdruk (en dus een hoge dichtheid). De overgang tussen beide takken gebeurt uiterst rechts in de grafiek, waar de voertuigen de opstopping verlaten.

De empirische validatie van deze grafiek werd door verschillende mensen aangetoond. Persaud en Hurdle ([Hal96], paragraaf 2.3.2) toonden in 1988 aan dat het segment uiterst rechts in de grafiek in figuur 2.2 (in de buurt van q_{max}) overeen-

komt met voertuigen die de wachtrij verlaten : hoe verder van het begin van de wachtrij ze hun metingen deden (stroomafwaarts weliswaar), hoe sneller de voertuigen reden, wat dit bijna verticale segment verklaart. Toen het aantal vakken op de autosnelwegen toenam, dienden de originele grafieken in de in 1985 verschenen *Highway Capacity Manual* aangepast te worden (in de nieuwere editie van 1994) om te compenseren voor de hogere snelheden en doorstromingsgraden ([Hal96], paragraaf 2.3.2). Bijkomend werk ondersteunde het idee dat de snelheden zelfs bij redelijk hoge doorstromingsgraden bijna constant bleven. Belangrijke studies werden verricht naar het ontstaan van wachtrijen bij ‘kneelpunten’ (*bottle-necks*) en hun repercussies op de doorstromingsgraad van het verkeer.

In 1990 poogden Heidemann en Hotop ([Hal96], paragraaf 2.3.2) de bovenste tak in de grafiek in figuur 2.2 te benaderen met behulp van een stuksgewijze lineaire interpolatie. Verder deden Stappert en Theis ([Hal96], paragraaf 2.3.2) een parameter-schatting voor een specifieke functie :

$$v = (A - e^{BQ})e^{-C} - Ke^{DQ}, \quad (2.1)$$

met v de snelheid, Q de doorstromingsgraad, C en D constante ‘krommingsfactoren’ tussen 0,2 en 0,003 en A , B en K modelparameters.

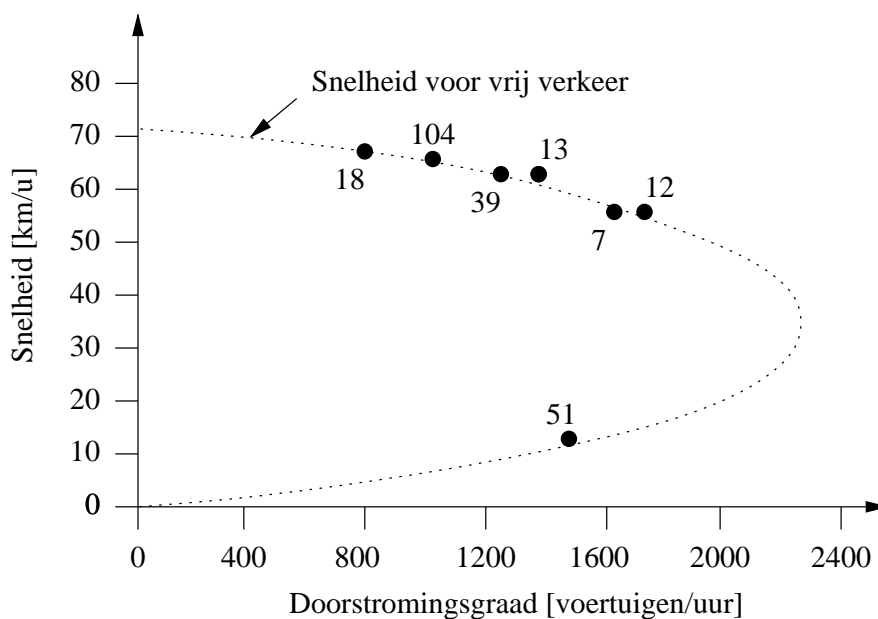
Theoretische bespreking

Het probleem met de theorie over verkeersstromen is dat de gebruikte grafieken empirisch afgeleid zijn. Er blijkt niet echt een theorie te bestaan die hun specifieke vorm verklaart. Het doel van de verkeersstroomdeskundigen is om een samenhangende reeks van vergelijkingen te ontwikkelen die de realiteit zo getrouw mogelijk kunnen nabootsen. De ontwikkelde modellen zullen niet noodzakelijk de vorm van de snelheid-doorstromingsgraad grafiek in figuur 2.2 volgen.

Het allereerste werk aan deze theorie werd verricht door Greenshields in 1935 ([Hal96], paragraaf 2.3.2). Hij leidde een parabolische vergelijking af voor de snelheid-doorstromingsgraad grafiek op basis van een lineaire relatie tussen snelheid en dichtheid gecombineerd met volgende vorm van de fundamentele vergelijking : doorstromingsgraad = snelheid \times dichtheid. Zijn vergelijking luidt als volgt :

$$q = k_j \left(v - \frac{v^2}{v_f} \right), \quad (2.2)$$

met q de doorstromingsgraad, v de gemiddelde snelheid, v_f de snelheid voor vrij verkeer en k_j de opstopingsdichtheid (*jam density*). De grafiek in figuur 2.3 toont



Figuur 2.3: De grafiek voor de snelheid-doorstromingsgraad relatie volgens Greenshields.

deze functie en de reeks metingen die er aan de basis van liggen. De cijfers bij de datapunten stellen het aantal geobserveerde 100-voertuig-groepen voor op Labour Day in 1934. De observaties gebeurden voor 1 richting op een rijbaan met twee vakken en twee richtingen. Tijdens het tellen van de voertuigen werd verondersteld dat elke tiende voertuig het begin van een nieuwe groep van 100 voertuigen was (er is dus een overlapping van 90% tussen twee naburige groepen). De observaties zijn dus *niet* onafhankelijk. Ook belangrijk is te vermelden dat de gegevens gegroepeerd werden in doorstromingsgraden van 200 voertuigen/uur en dat alvorens de data in grafiek te zetten, deze groepen eerst werden uitgemiddeld. Het enkele punt onderaan de grafiek, waar het verkeer is opgestopt en 51 (overlappende) groepen van 100 observaties worden voorgesteld, komt van een totaal andere autobaan. Sterker nog, de data ervoor werd op een andere dag verzameld.

De grafiek met Greenshields' parabool werd decennia lang beschouwd als de correcte vorm voor snelheid-doorstromingsgraad modellen, al werd hij wel merkbaar aangepast rond 1985. Pas in 1994, met de publicatie van een nieuwe editie van de *Highway Capacity Manual*, werd een volledig verschillende empirische werkelijkheid aanvaard. Greenshields' model domineerde dus voor ruim 50 jaar, ondanks de volgende problemen (die niet direct aan hem lagen) :

- Greenshields werkte niet met data van autosnelwegen, toch werd zijn werk

(gebaseerd op een enkel vak met verkeer) rechtstreeks toegepast op autosnelweg-situaties,

- onder de huidige onderzoeksstandaarden wordt zijn methode van data-analyse (de overlappende groepen en het uitmiddelen van de data alvorens ze in grafiekvorm te verwerken) niet aanvaard,
- het experiment werd uitgevoerd tijdens een vakantiedag, maar tegenwoordig richt het verkeersstroomonderzoek zich meer op regelmatige voertuigbestuurders die bekend zijn met de rijbaan (zodoende kan men beter vaststellen wat de capaciteit van de rijbaan is).

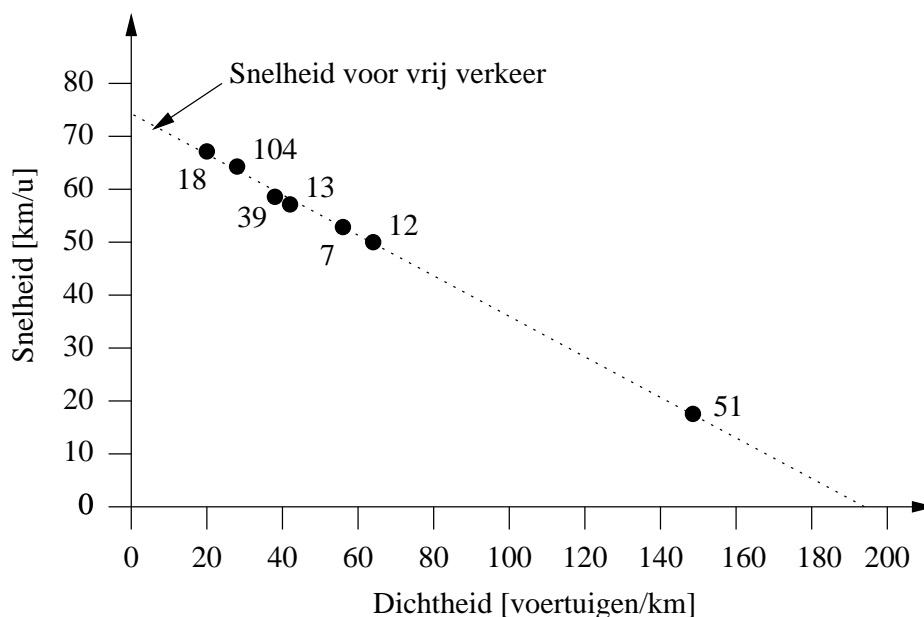
Het is interessant om het verschil te zien tussen snelheid-doorstromingsgraad modellen van de meer recente jaren (en vooral dan voor autosnelwegen) en de snelheid-doorstromingsgraad modellen van ruim 20 jaar geleden. In die tijd was het aantal bladzijden gependend aan dit onderwerp redelijk beperkt, de grafieken waren schaars en de bestudeerde situaties waren meestal artificieel van aard (testbanen, ...). Tegenwoordig zijn al die situaties reëel en is het aantal gepubliceerde bladzijden schijnbaar evenredig toegenomen met de verkeersdruk in de wereld. Aan dit onderwerp wordt nu nog altijd veel werk besteed aangezien men van opvatting is dat het een zeer belangrijke peiler is voor Intelligente Transport Systemen. Gerlough en Huber ([Hal96], paragraaf 2.3.2) stelden dat van zodra een snelheid-concentratie model voorhanden is, men het snelheid-doorstromingsgraad model eruit kan afleiden. Deze manier van werken wordt voor het moment beschouwd als de ‘populaire’ manier.

2.2.2 Snelheid-dichtheid modellen

Greenshields’ lineaire model van snelheid en dichtheid werd in paragraaf 2.2.1 al eens vermeld. Het kan als volgt samengevat worden : de gemeten data zijn snelheden en doorstromingsgraden, dichtheid wordt berekend aan de hand van de fundamentele vergelijking 1.20. Eens de data in een grafiek wordt verwerkt (zie figuur 2.4) kan men lineaire regressie toepassen wat resulteert in een lineaire functie in snelheid en dichtheid :

$$v = v_f \left(1 - \frac{k_j}{k} \right), \quad (2.3)$$

met v de snelheid, v_f de snelheid voor vrij verkeer, k_j de opstoppingsdichtheid (*jam density*) en k de dichtheid van de verkeersstroom.



Figuur 2.4: De grafiek voor de snelheid-dichtheid relatie volgens Green-shields.

Het verrassende is niet dat dit simpele analytisch model in 1935 gebruikt werd maar wel dat de resultaten ervan zo lang aanvaard werden ! Een aantal latere studies – uitgevoerd door Huber ([Hal96], paragraaf 2.3.3) – bevestigden enerzijds dit model maar anderzijds waren er ook enkele studies – uitgevoerd door Drake ([Hal96], paragraaf 2.3.3)– die tegenstrijdig waren met het model.

Greenberg besloot daarom om het in zijn model over een andere boeg te gooien ; hij introduceerde een logaritmische afhankelijkheid in plaats van de algemeen aanvaarde lineaire afhankelijkheid. Dit leidde tot volgende vergelijking :

$$v = c \ln \left(\frac{k_j}{k} \right), \quad (2.4)$$

met v de snelheid, k de dichtheid, k_j de opstoppingsdichtheid (*jam density*) en c een evenredigheidsconstante. Het gebruik van deze vergelijking gaf betere resultaten dan het gebruik van vergelijking 2.3.

2.2.3 Doorstromingsgraad-concentratie modellen

Aan dit soort modellen werd door de verkeersstroomdeskundigen opvallend minder aandacht besteed dan aan de vorige twee. Oorspronkelijke studies in ver-

band met de capaciteit van autosnelwegen gebeurden op twee manieren. Enerzijds werden de snelheid-doorstromingsgraad modellen bij lage concentraties onderzocht en anderzijds werden tussentijden onderzocht bij hoge concentraties. De doorstromingsgraad-concentratie modellen unificeren beide studies wat het belang ervan duidelijk aantoonst ; Haight noemde deze modellen de *basis diagrammen van het verkeer* ([Hal96], paragraaf 2.3.4).

De meeste doorstromingsgraad-concentratie modellen werden afgeleid uit veronderstellingen over de vorm van de snelheid-concentratie modellen. Concentratie moet vanaf nu dan ook opgevat worden als zijnde bezetting of dichtheid.

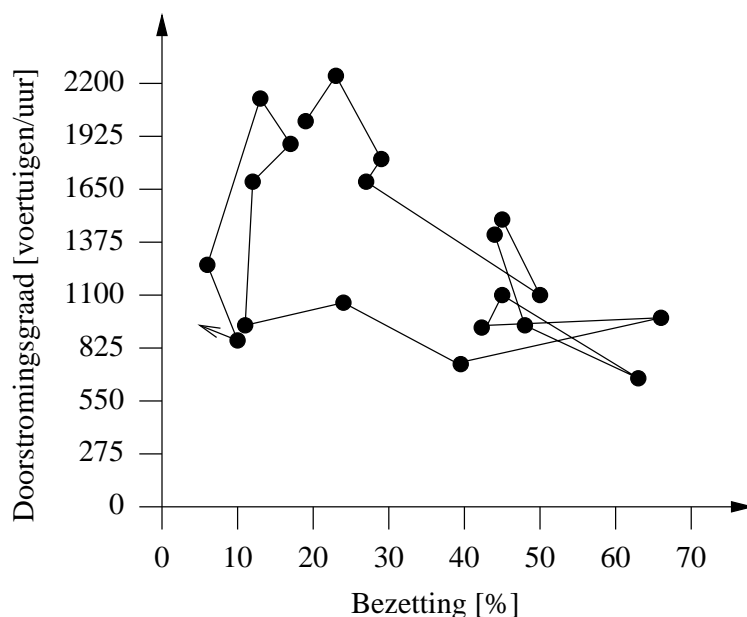
Edie ([Hal96], paragraaf 2.3.4) was waarschijnlijk de eerste om op te merken dat gegevens over doorstromingsgraden en concentraties geregeld discontinuïteiten zouden vertonen bij de maximale doorstromingsgraad, hij suggereerde dan ook het gebruik van discontinue grafieken bij het onderzoek naar de relatie tussen doorstromingsgraden en concentraties. Onderzoekers probeerden ook het verband met de voertuig-volg modellen (*car-following models*) – deze beschrijven hoe een voertuig een ander voertuig volgt – en schokgolven in het verkeer – dit zijn abrupte veranderingen in de snelheid, doorstromingsgraad of dichtheid van een verkeersstroom – te specificeren. Athol was één van de eersten om bezetting te gebruiken bij de studie naar doorstromingsgraad-concentratie modellen. Hij suggereerde ook het gebruik van doorstromingsgraad en bezetting om het begin van filevorming, namelijk de overgang van vrij verkeer naar opgestopt verkeer bij volumes lager dan de baancapaciteit, beter te begrijpen. Het gebruik van dit soort modellen is echter zeer beperkt gebleven tot halweg de jaren '80. Toen werd een experiment uitgevoerd in Near Toronto waarbij gegevens met vaste periode bekomen werden en in grafiek gezet. Het resultaat zag eruit zoals de grafiek in figuur 2.5 (de pijl duidt de chronologische volgorde aan waarin de datapunten werden bekomen).

Dit type grafiek werd uitvoerig bestudeerd en het bleek dat schokgolven in het verkeer eruit afgeleid konden worden. De eerder besproken wiskundige modellen konden dit gedrag niet voorspellen of verklaren.

Merk op : indien men dichtheid in plaats van bezetting gebruikt dan verkrijgt men de grafiek uit figuur 2.1 in plaats van de grafiek uit figuur 2.5.

2.2.4 Drie-dimensionale modellen

Er is nog niet veel werk verricht dat de drie grootheden, snelheid, doorstromingsgraad en concentratie (dichtheid of bezetting), samen behandelt. Het is gebleken dat empirische observaties zelden exact overeenkomen met de relatie $q = vk$ (zeker tijdens periodes van opstopping). Eén van de veelgehoorde conclusies is dat de conventionele theorie ontoereikend is om de gegevens te verklaren en

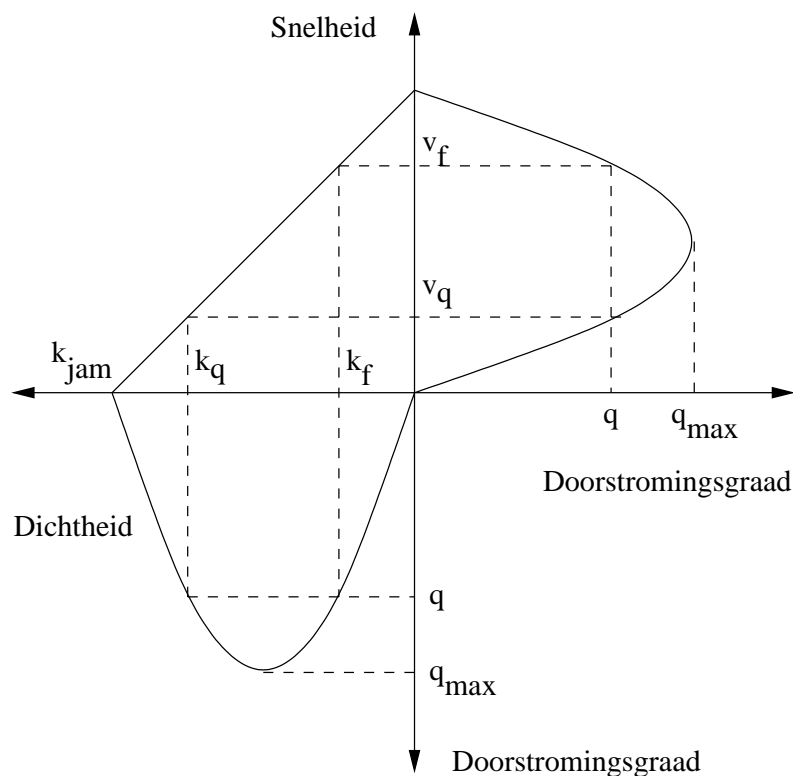


Figuur 2.5: Een typische grafiek voor de doorstromingsgraad-concentratie relatie.

dat de gegevens meer aanleunen bij een alternatief model dat gebaseerd is op catastrofe-theorie. De naam van deze theorie stamt uit het feit dat alhoewel de meeste gemodelleerde variabelen op een continue manier veranderen, er wel minstens één plotse discontinue veranderingen kan ondergaan (welke men dan catastrofes noemt). Eén van de modellen gebaseerd op catastrofe-theorie heeft twee variabelen (*de controle-variabelen*) die kalm en continue veranderen en een derde variabele (*de toestandsvariabele*) die een plotse catastrofale sprong van haar waarde kan ondergaan. Men suggereert dat deze variabele de snelheid zou zijn.

De voorspelbaarheid van modellen gebaseerd op de catastrofe-theorie blijkt redelijk goed te zijn (de gemeten snelheden komen overeen met de voorspelde snelheden). De twee grootste voordelen die deze modellen met zich mee dragen zijn (1) dat er op autosnelwegen plotse verschillen in snelheden kunnen optreden en (2) dat de observaties kunnen verschillen al naargelang de plaats waar ze werden gemaakt.

De grafiek in figuur 2.6 toont visueel het verband tussen de drie grootheden snelheid, doorstromingsgraad en concentratie (nu beschouwd als dichtheid). De getoonde waarden zijn q de doorstromingsgraad, q_{max} de maximale doorstromingsgraad, v_f de snelheid voor vrij verkeer, v_q de snelheid voor opgestopt verkeer, k_f de dichtheid voor vrij verkeer, k_q de dichtheid voor opgestopt verkeer en k_{jam} de opstopingsdichtheid. Weerom is te zien dat er bij elke doorstromingsgraad q



Figuur 2.6: Snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid samen beschouwd.

twee snelheden v_f en v_q horen, alsmede twee overeenkomstige dichtheden k_f en k_q .

2.2.5 Conclusies

De huidige situatie met betrekking tot de empirische stroommodellen zit in een overgangsfase : de modellen die de laatste 30 jaar gebruikt werden, zijn niet meer in overeenstemming met de geobserveerde data. Ondanks dit feit heeft men echter nog geen vervangende modellen ontwikkeld ! Een verklaring hiervoor is dat de theoretici nog altijd werken in termen van dichtheid terwijl de data eigenlijk wordt bekomen in termen van bezetting.

Het is belangrijk dat men werkt met gegevens die alle drie de grootheden snelheid, doorstromingsgraad en concentratie omvatten en dat men niet een grootheid moet schatten aan de hand van de andere twee daar deze laatste methode fouten kan introduceren.

Voor het moment lijkt catastrofe-theorie een goede (zometer de beste) uitkomst te

bieden en het werk ernaar dient dan ook aangemoedigd te worden. De besproken modellen zijn louter empirisch, de volgende stap is een meer theoretische behandeling. In het volgende deel worden modellen gebaseerd op vloeistofdynamica besproken.

2.3 Continue stroommodellen

Als men een autosnelweg van bovenaf bekijkt dan kan men deze verkeersstroom visualiseren als een vloeistof. Het lijkt daarom logisch om een verkeersstroom dan ook als een vloeistof te behandelen. Verkeer wordt daarom ook beschreven met termen zoals doorstromingsgraad, concentratie en snelheid. In dit deel wordt een verkeersstroom behandeld als een één-dimensionale samendrukbare vloeistof. Deze analogie leidt tot twee basisveronderstellingen :

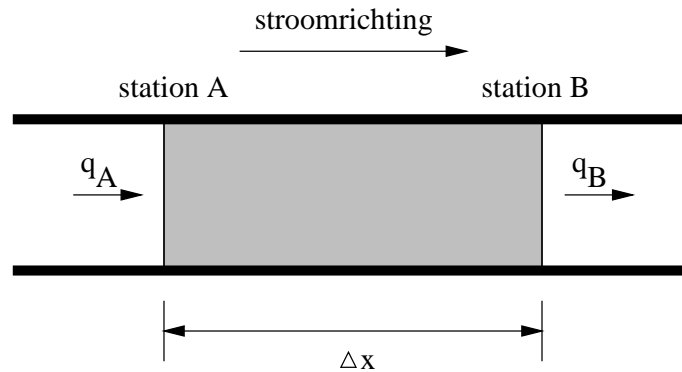
- er is behoud van doorstroming
- en er bestaat een 1-op-1 relatie tussen snelheid en dichtheid of tussen doorstromingsgraad en dichtheid.

De eerste veronderstelling is algemeen aanvaard en wordt uitgewerkt in paragraaf 2.3.1. In de literatuur vindt men echter tal van bezwaren tegen de tweede veronderstelling, deels omdat ze niet volledig wordt begrepen en deels omdat ze de metingen tegenspreekt. De eerder geziene relatie $v = f(k)$ met v de snelheid en k de dichtheid kan theoretisch gezien negatieve resultaten opleveren. Men heeft trouwens ook nog geobserveerd dat voor eenzelfde dichtheid meerdere snelheden opgemeten kunnen worden. De aanpassing die wordt gedaan is dat men de tweede veronderstelling anders formuleert : *snelheid of doorstromingsgraad is enkel bij evenwicht een functie van de dichtheid*. Vermits dit evenwicht echter moeilijk in praktijk vast te stellen is, wordt het meestal gewoon aangenomen of theoretisch afgeleid.

De basis voor dit deel is terug te vinden in [Kou99b] en [KM96].

2.3.1 Behoud van doorstroming

De vergelijking voor het behoud van doorstroming kan afgeleid worden door het beschouwen van een continu deel van de baan in enkele richting, met twee telstations A en B (zie figuur 2.7). De afstand tussen beide stations is Δx en er wordt verondersteld dat tussen A en B geen opritten of afritten zijn (er is dus geen generatie of dissipatie van voertuigen (stroming) in dat gedeelte). Stel N_i is het aantal



Figuur 2.7: Rijbaangedeelte gebruikt voor het afleiden van behoud van doorstroming.

voertuigen dat station i passeert gedurende een tijd Δt en q_i de doorstromingsgraad in station i (met $i \in \{A, B\}$). Δt is de tijd nodig om zowel in station A als in station B te tellen. Stel, zonder verlies aan algemeenheid, dat $N_A > N_B$. Vermits er geen voertuigen gegenereerd worden tussen A en B betekent dit dat er een opbouw aan voertuigen tussen A en B is.

Als nu $(N_B - N_A) = \Delta N$ is, dan krijgen we volgende vergelijkingen :

$$\frac{N_A}{\Delta t} = q_A = \text{doorstromingsgraad aan station A} \quad (2.5)$$

$$\frac{N_B}{\Delta t} = q_B = \text{doorstromingsgraad aan station B}, \quad (2.6)$$

waarbij de vorming aan voertuigen tussen beide stations gedurende een tijd t , gelijk is aan :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \Delta q = \frac{N_B - N_A}{\Delta t} \Rightarrow \Delta N = \Delta q \Delta t. \quad (2.7)$$

Als nu Δx klein genoeg is zodat de dichtheid (concentratie) k erin uniform is, dan zal de toename aan concentratie Δk tussen stations A en B gedurende het tijdsinterval Δt als volgt zijn :

$$\Delta k = \frac{-(N_B - N_A)}{\Delta x} = \frac{-\Delta N}{\Delta x}. \quad (2.8)$$

De opbouw aan voertuigen tussen A en B is dus :

$$-\Delta N = \Delta k \Delta x. \quad (2.9)$$

Omdat de voertuigen behouden blijven (er is immers geen dissipatie) geldt :

$$-(\Delta q \Delta t) = \Delta k \Delta x \Rightarrow \frac{\Delta q}{\Delta x} + \frac{\Delta k}{\Delta t} = 0. \quad (2.10)$$

Als we nu veronderstellen dat het medium continu is en de discrete toenames infinitesimaal klein worden, dan kunnen we de limiet nemen en krijgen we :

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0. \quad (2.11)$$

Vergelijking 2.11 drukt de wet van het behoud van een verkeersstroom uit en is gekend als de conservatie- of continuïteitsvergelijking (*continuity equation*). Haar vorm is dezelfde voor vloeistofstromen. Er werd aangenomen dat er geen verkeer gegenereerd wordt tussen stations A en B, indien dit wel het geval is dan wordt volgende algemene vorm gebruikt :

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = g(x, t), \quad (2.12)$$

waarbij $g(x, t)$ de generatiegraad is, uitgedrukt in voertuigen per tijdseenheid per lengte-eenheid.

2.3.2 Analytisch oplossen van de eerste orde continuïteitsvergelijking : schokgolven

De algemene continuïteitsvergelijking 2.12 is bijzonder aantrekkelijk omdat ze twee fundamentele afhankelijke grootheden, dichtheid k en doorstromingsgraad q , relateert aan twee onafhankelijke grootheden, tijd t en ruimte x . Oplossen van deze vergelijking kan niet zonder toevoeging van een extra vergelijking of aanname. Het analytisch oplossen van de continuïteitsvergelijking, toegepast op verkeersstromen, werd voor het eerst voorgesteld door Lighthill, Whitham en Richards ([KM96], paragraaf 5.1.1).

Zij stelden dat de doorstromingsgraad q een functie is van de dichtheid k . Dus $q = f(k)$ en equivalent hiermee $v = f(k)$. Men ziet nu dat er in vergelijking 2.12 slechts één vergelijking zit met één onbekende en dus kan deze analytisch opgelost worden. Oplossen van de algemene vergelijking is echter zeer complex en onpraktisch voor realistische toepassingen. Vandaar dat we ons beperken tot het

basisgeval waarin $g(x, t) = 0$ (in het andere geval is men genoodzaakt numerieke oplossingsmethoden te gebruiken). Vergelijking 2.11 wordt nu :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x}(kv) + \frac{\partial k}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x}(kf(k)) + \frac{\partial k}{\partial t} \\
 &= f(k)\frac{\partial k}{\partial x} + k\frac{df}{dk}\frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} \\
 &= \left[f(k) + k\frac{df}{dk} \right] \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0. \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

Merk op dat $f(k)$ eender welke functie kan zijn, men kan bijvoorbeeld Greenshields' lineaire relatie 2.3 (zie figuur 2.4) gebruiken. Deze vergelijking is een quasi-lineaire partiële differentiaalvergelijking en de oplossing ervan gebeurt met behulp van 'karakteristieken' (dit zijn rechten met dezelfde dichtheid, $x = x_0 + h(k)t$). Details in verband met het opstellen van de oplossing zijn terug te vinden in [LW55]. Deze oplossing suggereert volgende punten :

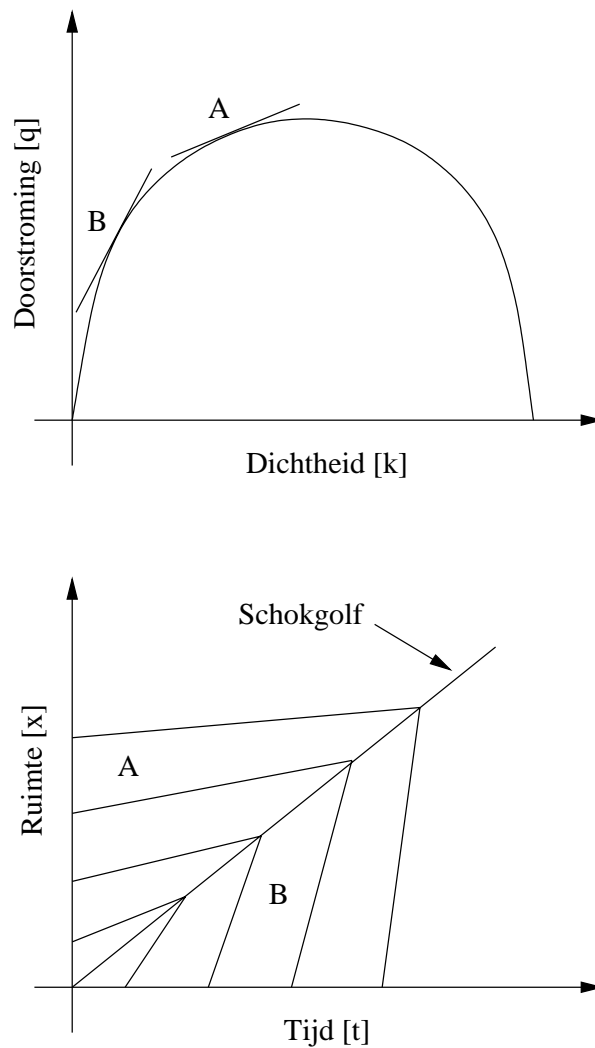
- de dichtheid k is constant langs een familie van lijnen, karakteristieken of golven genoemd,
- een golf stelt de beweging (propagatie) voor van een verandering in doorstromingsgraad en dichtheid langs de rijbaan,
- de helling van een karakteristiek is $\frac{dx}{dt}$ en deze is gelijk aan $h(k) = f(k) + k\frac{df}{dk} = \frac{dq}{dk}$,
- als twee karakteristieken elkaar snijden dan wil dit zeggen dat de dichtheid in het snijpunt twee verschillende waarden heeft, wat fysisch onmogelijk is. Deze discrepantie wordt verklaard door de generatie van schokgolven.

Deze schokgolven stellen wiskundige discontinuïteiten voor zoals abrupte veranderingen in k , q of v . Dus, als twee karakteristieken elkaar snijden dan ontstaat er een schokgolf en eindigen de karakteristieken. De snelheid van een schokgolf is gelijk aan de helling van de karakteristiek in het punt waar de schokgolf ontstond.

Figuur 2.8 illustreert het identificeren van schokgolven en het volgen van hun pad. Op de k-q-grafiek is te zien dat punt A een situatie voorstelt waarbij het verkeer dicht bij de baancapaciteit stroomt (wat wil zeggen dat de snelheid er redelijk onder de snelheid voor vrij verkeer zit). Punt B stelt een situatie voor waarbij geen opstopping is (kleinere dichtheid). De raaklijnen aan de grafiek in A en B stellen de golfsnelheden voor in beide situaties. Op de t-x-grafiek zijn paden van

de golven te zien. Men ziet dat de snellere stroomsnelheid in punt B later in de tijd gebeurt dan in punt A. Vandaar dat de karakteristieken van B uiteindelijk die van A zullen snijden wat een schokgolf als gevolg heeft.

Merk op dat de golven in de t - x -grafiek *niet* de paden van de voertuigen zijn maar lijnen waar een constante doorstromingsgraad en snelheid heerst. Deze lijnen tonen de propagatie van situaties A en B.



Figuur 2.8: Vorming van een schokgolf bij het oplossen van de continuïteitsvergelijking.

2.3.3 Hogere orde continue stroommodellen

Eén van de grootste problemen met de eerste orde continue stroommodellen zit in de manier waarop de vorming van schokgolven wordt gemodelleerd. Dit gebeurt met karakteristieken die abrupte veranderingen van variabelen voorstellen, er worden dus scherpe sprongen gemaakt. Een hoger orde continu stroommodel is daarentegen gebaseerd op gemiddelde waarden van een aantal voertuigen en dit vult de onnatuurlijke scherpe sprongen uit zodat er geen abrupte veranderingen in snelheden optreden zonder dat er tijd is om af te remmen of te versnellen.

Om dit te bewerkstelligen wordt aan deze modellen een voortstuwende vergelijking (*momentum equation*) toegevoegd die de versnellings- en inertie-karakteristieken van de verkeersmassa in rekening brengt. De complexiteit van dergelijke hogere orde continue stroommodellen is een stuk groter dan die van de eerste orde continue stroommodellen, waarvoor het afleiden en kalibreren (dit is het vinden van geschikte waarden voor alle parameters) ervan een moeilijke taak is.

Een effect dat vooral waargenomen wordt op Europese snelwegen is het vormen van start- en stopgolven. Dit zijn golven van voertuigen die moeten stoppen en terug vertrekken, een typisch gedrag in opgestopt verkeer. Dit komt doordat er op veel autosnelwegen maar twee vakken per rijrichting zijn en er meestal een dichtheid heerst die de kritieke dichtheid overschrijdt, wat als gevolg heeft dat de verkeersstroom onstabiel is. Dit laatste wil zeggen dat de start- en stopgolven harmonische oscillaties vertonen die ongeveer dezelfde vorm en redelijk grote periodes hebben.

Als voorbeeld van een hoger orde continu stroommodel wordt kort dat van Payne besproken ([KM96], paragraaf 5.2.3). Hij nam aan dat de snelheid $v(x, t)$ van een klein ensemble voertuigen bekomen wordt uit de snelheid-dichtheid relatie bij evenwicht na een zekere vertragingstijd τ (de reactietijd) en uit een geanticiperde plaats $x + \Delta x$:

$$v(x, t + \tau) = V_e(k(x + \Delta x, t)), \quad (2.14)$$

met V_e de snelheid bij evenwicht. In combinatie met de continuïteitsvergelijking levert dit een stelsel partiële differentiaalvergelijkingen op waarvan verondersteld wordt dat ze het dynamisch gedrag, geassocieerd met een verkeersstroom, beschrijven. Na gebruik van de kinematische gastheorie en de hydrodynamische vergelijkingen van Navier Stokes kan men de parameters in de resulterende oplossing correct bepalen.

Er rest nog wel altijd een probleem : de besproken modellen slaagden er tot nog toe niet in om flessenhalzen (*bottlenecks*) en start- en stopgolven correct te

beschrijven. Hogere orde continue stroommodellen die gebruik maken van de ‘viscositeit’ van een verkeersstroom kunnen dit wel. In concreto komt het erop neer dat er een extra term, de viscositeitsterm, in de voortstuwende vergelijking wordt geïntroduceerd. Het gebruik van dit soort modellen is echter zeer beperkt aangezien men nog niet volledig begrijpt wat hun betekenis is.

2.3.4 Stochastische continue stroommodellen

Alle metingen van snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid tonen aan dat een verkeersstroom een dynamisch, stochastisch proces is dat niet volledig beschreven kan worden met behulp van macroscopische vloeistof-variabelen. De vraag stelt zich dan ook hoe dit stochastisch karakter in de macroscopische definitie geïncorporeerd moet worden en welke gevolgen afgeleid kunnen worden uit dit stochastisch gedrag ? Uit metingen bleek dat er twee belangrijke factoren zijn :

- de verdeling van snelheden gedurende opstoppingen
- en de verdeling van versnellingsruis.

Heidemann ([KM96], paragraaf 5.3.2) was in 1986 de eerste die de verdeling van snelheden berekende als functie van de verkeersdichtheid door de kansen van overgang tussen verschillende snelheidsklassen te gebruiken. Hij vond dat een kritieke dichtheid van 25 voertuigen/kilometer typisch is voor het begin van opstoppingen.

Een stochastische theorie moet het ruiskarakter van verkeersstromen kunnen kwantifiëren. Dit ruiskarakter vloeit voort uit het feit dat de bestuurders van voertuigen beïnvloed worden door factoren zoals oneffenheden in de rijbaan, bochten, concentratiestoornissen en verschillende motorcapaciteiten. In het algemeen wordt de versnelling van een voertuig opgesplitst in een term die de snelheid controleert (met betrekking tot de voorligger van het voertuig in kwestie) en een willekeurige term die de versnellingsruis voorstelt. Herman ([KM96], paragraaf 5.3.3) was in 1959 de eerste om metingen van de versnellingsruis te verrichten : hij mat de versnelling die een voertuig onderging in verschillende omstandigheden.

De basis van een stochastische beschrijving van een verkeersstroom is dat snelheid en dichtheid niet langer discrete waarden aannemen maar willekeurig verdeeld zijn rond zekere gemiddelde waarden. Het microscopisch gedrag wordt niet langer gegeven door een vaste afstandswet maar door een verdeling van de tussentijden. Analooq wordt het macroscopisch gedrag uitgedrukt door een kansverdeling van het verkeersvolume.

2.3.5 Conclusies

In dit deel werden verkeersstromen beschouwd met behulp van vloeistofdynamica. Dit gebeurde in verschillende stappen : eerst werd het behoud van doorstroming geformuleerd dat doorstromingsgraden en dichtheden met elkaar associeert. Vervolgens werd een eenvoudige oplossing voor deze vergelijking geformuleerd wat aanleiding gaf tot schokgolven. Aangezien deze schokgolven onnatuurlijk zijn werden hogere orde continue stroommodellen ontwikkeld waarvan de oplossing helaas veel complexer is dan bij eerste orde continue stroommodellen. Tenslotte werden stochastische continue stroommodellen besproken die een fundamenteel andere basisveronderstelling hebben (namelijk het gebruik van stochastische variabelen in plaats van sterk afgebakende, discrete waarden).

De continue stroommodellen werden vanuit een theoretisch standpunt geconstrueerd, in tegenstelling tot de empirische stroommodellen. Deze continue stroommodellen hebben een grotere verklaringskracht dan de empirische stroommodellen : het typische golfkarakter van een verkeersstroom kan uit de eerste soort afgeleid worden terwijl de laatste soort dit enkel kan bevestigen (door de geobserveerde data in grafiek te zetten en de oscillaties te tonen). Een praktische toets hiervoor is het fenomeen van de remmende voertuigen dat besproken werd in het inleidend illustratief voorbeeld. De daarin vermelde golfpropagatie kan waarschijnlijk door toepassing van continue stroommodellen bevestigd worden, al is dit – zoals reeds eerder gezegd – nog niet bewezen.

Duidelijk is dat met de continue stroommodellen een betere – meer natuurlijke – voorstelling van een verkeersstroom kan geconstrueerd worden. Het probleem dat zich nu echter stelt is de complexe manier van oplossen (al kunnen numerieke oplossingen wel veel goed maken). Daarbij komt dan ook nog eens het feit dat men in de continue stroommodellen beter stochastische stroommodellen incorporeert om een zo realistisch mogelijk model te bekomen, wat weer extra complexiteit introduceert (aangezien er nu rechtstreeks met kansverdelingen dient gewerkt te worden in plaats van enkele variabelen).

2.4 Macroscopische stroommodellen

Er bestaan verschillende technieken om een verkeersstroom te optimaliseren. Deze gaan van de optimalisatie van de tijdsregeling van verkeerslichten (met behulp van uitgebreide en ingewikkelde computerprogramma's) tot fysieke wijzigingen zoals het introduceren van een extra vak (door bijvoorbeeld parkeerplaatsen te elimineren). De moeilijkheid zit echter in het evalueren van dergelijke methodes. Hoe

nuttig zijn ze ? Welke verbeteringen brengen ze met zich mee ? Deze zaken werden de laatste 30 jaar met gematigd succes bestudeerd maar telkens stuitte men op hetzelfde probleem : als *aparte componenten* is het mogelijk om bijvoorbeeld de effectiviteit van een rond punt te evalueren, maar het blijkt een stuk ingewikkelder om het *hele wegennetwerk* collectief te bestuderen.

Eerst en vooral dient er een kwaliteitsmaat gedefinieerd te worden en in het algemeen zal men daarvoor de performantie van een wegennetwerk onder verschillende geometrische configuraties en verkeerscondities meten. Vervolgens wordt een specifiek model besproken dat zich baseert op de reistijden van de voertuigen. Tenslotte wordt ingegaan op twee algemene netwerkmodellen.

Daar waar de vorig besproken modellen zich richtten op enkele delen van een wegennetwerk (en dus een beperkte reikwijdte hadden aangezien ze niet de interacties tussen de verschillende delen beschrijven en het moeilijk is om de individuele resultaten te combineren voor het gehele wegennetwerk), zullen de volgende macroscopische stroommodellen deze tekortkomingen oplossen door het hele wegennetwerk vanuit het standpunt van reistijden te beschrijven.

Merk op dat bij stroommodellen de term ‘macroscopisch’ op twee verschillende niveau’s wordt gebruikt : enerzijds in contrast met de term microscopisch wanneer het gaat over modellen die een verkeersstroom in zijn geheel beschouwen en anderzijds wanneer het gaat over modellen die een compleet wegennetwerk beschouwen.

Dit deel is gebaseerd op het werk van [Wil96].

2.4.1 Performantie van een verkeerssysteem

De performantie van een verkeerssysteem wordt gedefinieerd als de reactie van dat systeem op een gegeven reis-vraag-niveau (*travel demand level*). Het verkeerssysteem bestaat uit een netwerk-topologie (baanbreedte, wegenlokatie) en het verkeerscontrolesysteem (verkeersborden, verkeerslichten, vakovergangen). Een reis-vraag-niveau wordt bepaald door het aantal reizen (*trips*) tussen oorsprong- en bestemmingspunten alsmede de gewenste vertrek- en aankomsttijden.

De performantie kan dan gemeten worden aan de hand van het niveau van de service die wordt verleend aan de voertuigen. De voorgaande drie fundamentele grootheden, snelheid, doorstromingsgraad en concentratie, kunnen na aanpassing nu ook gebruikt worden voor complete wegennetwerken.

2.4.2 Reistijd modellen

Met behulp van reistijd-contouren is het mogelijk om een overzicht te krijgen hoe goed een wegennetwerk opereert op een bepaald ogenblik. Voertuigen vertrekken vanuit een bepaald punt en op geregelde tijdstippen wordt de tijd en positie bijgehouden. Men kan dan contouren van gelijke reistijden bepalen en de gemiddelde reistijden en snelheden in het wegennetwerk berekenen. Men moet echter wel in het achterhoofd houden dat deze informatie beperkt en gerelateerd is aan één punt. Het experiment zou herhaald moeten worden vanuit andere lokaties. Desalniettemin blijft het toch moeilijk om netwerkperformantie te vatten met slechts één variabele (in dit geval is dat reistijd of snelheid).

2.4.3 Algemene netwerk modellen

In 1966 beschouwde Smeed ([Wil96], paragraaf 6.2.1) het aantal voertuigen dat ‘nuttig’ het centrale gedeelte van een stad kan betreden. Hij definieerde N als het aantal voertuigen per tijdseenheid dat het stadscentrum kan betreden. Deze N hangt af van het ontwerp van het wegennetwerk, de baanbreedtes, de manier waarop het verkeer op kruispunten geregeld worden, de verdeling van de bestemmingen van de voertuigen en de verschillende types voertuigen. Hij construeerde volgende vergelijking :

$$N = \alpha f c \sqrt{A}, \quad (2.15)$$

waarbij A de stadsoppervlakte is, f de fractie van oppervlakte gewijd aan wegen, c de capaciteit (uitgedrukt in voertuigen per tijdseenheid per lengte-eenheid) en α een evenredigheidsconstante. In 1968 postuleerde hij dat voor een gegeven oppervlakte geldt dat hoe groter het stadscentrum is, hoe kleiner het aantal voertuigen is dat erin kan circuleren. Dit suggereert dat een ruime verspreide stadskern *niet* noodzakelijk de meest economische oplossing is.

Twee belangrijke netwerkmodellen worden besproken :

- de α -relatie
- en de twee-stromen (*two-fluid*) theorie.

2.4.4 De α -relatie

Zahavi ([Wil96], paragraaf 6.2.3) gebruikte bij zijn onderzoek in 1972 drie belangrijke variabelen, namelijk de verkeersintensiteit I (gedefinieerd als de af-

stand afgelegd per oppervlakte-eenheid), de wegendichtheid R (gedefinieerd als de lengte of oppervlakte van wegen per oppervlakte-eenheid) en ν , de snelheid uitgemiddeld in de ruimte (gewogen SMS). Nadat hij verschillende metingen had gedaan, bestudeerde hij de onderlinge relaties tussen deze variabelen en kwam tot de volgende vaststelling :

$$I = \alpha \left(\frac{\nu}{R} \right)^m, \quad (2.16)$$

waarbij α en m modelparameters zijn. Onderzoek naar de waarden voor deze twee parameters leidde tot de conclusie dat $m = -1$ zodat het model vereenvoudigd kon worden tot volgende vergelijking :

$$I = \alpha \frac{R}{\nu}, \quad (2.17)$$

waarbij α nu voor elke stad verschillend is. Het bleek dat fysieke karakteristieken van het wegennetwerk zoals baanbreedte en de dichtheid van kruispunten een sterk effect op de waarde van α voor elke zone in een stad hadden. De waarde van zo'n α kan dan gebruikt worden als een indicatie van het niveau van verkeersservice door een stad verleend (de kwaliteit van de verkeersservice verbetert met een stijgende α).

Spijtig genoeg bleek achteraf dat α sterk gerelateerd was aan de snelheid uitgemiddeld in de ruimte (SMS) en een sterke correlatie vertoonde met de concentratie.

2.4.5 De twee-stromen theorie

Prigogine en Herman ([Wil96], paragraaf 6.3) toonden in 1971 aan dat er in een verkeersstroom twee gescheiden stroomregimes vervat zijn. Dit zijn een individuele en collectieve stroom en ze zijn een functie van de voertuigconcentratie. Het blijkt dat wanneer de concentratie toeneemt (het verkeer komt in een collectief regime), het stroompatroon grotendeels *onafhankelijk* wordt van de wil van individuele bestuurders.

In hun werk verdeelden zij het verkeer in twee klassen (en dus in twee-stromen), namelijk bewegende voertuigen en gestopte voertuigen. Hun model geeft een macroscopische maat voor de kwaliteit aan verkeersservice-verlening in een wegennetwerk. Deze maat is, in tegenstelling tot de α -relatie, onafhankelijk van de concentratie.

Het model is gebaseerd op twee veronderstellingen :

- de gemiddelde voortbewegingssnelheid V_r in het wegennetwerk is evenredig met de fractie f_r aan voertuigen die voortbewegen
- en de stoptijd van een testvoertuig dat rond rijdt in het wegennetwerk is gelijk aan de gemiddelde fractie van de gestopte voertuigen gedurende dezelfde periode.

De variabelen in het twee-stromen model stellen gemiddelden van het hele wegennetwerk voor, genomen over een bepaalde tijdsperiode.

De eerste veronderstelling relateert de gemiddelde snelheid aan de fractie van bewegende voertuigen op volgende manier :

$$V_r = V_m f_r^n, \quad (2.18)$$

met als modelparameters V_m , de gemiddelde maximale voortbewegingssnelheid en n een indicator voor de kwaliteit van verkeersservice in het wegennetwerk. De gemiddelde snelheid V kan gedefinieerd worden als $V_r f_r$ en als we deze combineren met vergelijking 2.18 dan krijgen we :

$$V = V_m f_r^{n+1}. \quad (2.19)$$

Vermits nu $f_r + f_s = 1$ (met f_s de fractie gestopte voertuigen), kan vergelijking 2.19 herschreven worden als :

$$V = V_m (1 - f_s)^{n+1}. \quad (2.20)$$

De randvoorwaarden voor deze relatie zijn voldaan als $f_s = 0 \Rightarrow V = V_m$ en $f_s = 1 \Rightarrow V = 0$ gelden.

De relatie kan ook uitgedrukt worden in gemiddelde reistijden in plaats van in gemiddelde snelheden. T stelt de gemiddelde reistijd voor, T_r de gemiddelde tijd van voortbeweging en T_s de stoptijd. Allen worden uitgedrukt in lengte-eenheden. Bovendien gelden volgende relaties : $T = \frac{1}{V}$, $T_r = \frac{1}{V_r}$ en $T_m = \frac{1}{V_m}$ met T_m de gemiddelde minimale reistijd per lengte-eenheid (dus de gemiddelde minimale reistijd die ervaren kan worden door een enkel voertuig dat zonder stoppen in het wegennetwerk rondreist).

De tweede veronderstelling levert volgende relatie op :

$$f_s = \frac{T_s}{T}. \quad (2.21)$$

Deze relatie werd door Ardekani en Herman ([Wil96], paragraaf 6.3) analytisch bewezen en ze drukt uit dat de verkeerscondities voorgesteld kunnen worden door één voertuig dat het wegennetwerk bemonstert (*sampled*).

Als we vergelijking 2.19 uitdrukken in termen van reistijden, dan bekommen we :

$$T = T_m(1 - f_s)^{-(n+1)}. \quad (2.22)$$

Gebruik makende van vergelijking 2.21 levert dit :

$$T = T_m \left(1 - \frac{T_s}{T}\right)^{-(n+1)}. \quad (2.23)$$

Aannemende dat $T = T_r + T_s$ kunnen we de vergelijking oplossen naar T_r :

$$T_r = T_m^{\frac{1}{n+1}} T^{\frac{n}{n+1}}. \quad (2.24)$$

De formele definitie van het twee-stromen model is dan :

$$T_s = T - T_m^{\frac{1}{n+1}} T^{\frac{n}{n+1}}. \quad (2.25)$$

Het is uit veldtesten gebleken dat wegennetwerken gekarakteriseerd kunnen worden met de twee modelparameters n en T_m . Ze kunnen geschat worden door willekeurige voertuigen in het wegennetwerk te achtervolgen en voor bepaalde afstanden de waarden T_r en T berekenen (een voertuig wordt gevolgd – waarbij de volger het gedrag van zijn voorligger zo goed mogelijk probeert na te bootsen – en van zodra het parkeert of het wegennetwerk verlaat wordt het dichtbijzijnde voertuig gevolgd). Vervolgens past men dan een logaritmische transformatie toe op vergelijking 2.24 zodat een kleinste-kwadraten analyse kan uitgevoerd worden. Hoe kleiner n en T_m zijn, hoe beter de service is die door het wegennetwerk geleverd wordt.

Het volgen van voertuigen levert nog een ander inzicht op : men kan studies verrichten naar het gedrag van conservatieve en agressieve bestuurders. Het blijkt dat bij druk verkeer agressieve bestuurders dezelfde resultaten opleveren dan de conservatieve bestuurders, wat wil zeggen dat de bestuurders hun reistijd *niet* kunnen verkorten door agressiever te gaan rijden. Langs de andere kant geldt wel dat agressieve bestuurders een beduidend kortere reistijd hebben indien het *geen* druk verkeer betreft.

2.4.6 Conclusies

Macroscopische stroommodellen leveren een nieuwe bijdrage die de eerder besproken modellen misten, namelijk het beschouwen van een grootschalig wegennetwerk. Aangezien het niet zo evident is om de fundamentele grootheden, snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid, te bepalen voor deze wegennetwerken, werd een nieuw concept geïntroduceerd, namelijk de gemiddelde minimale reistijd die een aanduiding kan geven van de service die een wegennetwerk kan leveren.

Gezien de ruime mogelijkheden van Intelligente Transport Systemen is er de noodzaak naar een begrijpbaar, netwerkwijs hulpmiddel. Al zijn de in dit deel besproken modellen niet eenvoudig te implementeren, toch blijken ze veelbelovend te zijn : in San Antonio ([Wil96], paragraaf 6.3.6) werden in 1994 met succes studies verricht door gebruik te maken van het twee-stromen model.

2.5 Stroommodellen gebaseerd op wachtrij-theorie

Als laatste in de rij worden stroommodellen besproken die gebaseerd zijn op wachtrij-theorie waardoor zij fundamenteel verschillen van de vorige stroommodellen. Net zoals de macroscopische stroommodellen kunnen ook deze modellen worden gebruikt om complete wegennetwerken te beschrijven. Dit is een eigenschap die niet in de empirische en continue stroommodellen aanwezig is. In wat volgt wordt er ingegaan op de theoretische achtergrond van het toepassen van wachtrij-theorie op verkeersstromen waarna de uitwerking van verschillende modellen besproken wordt.

Dit deel is gebaseerd op [VWV00].

2.5.1 Theoretische achtergrond

Wachtrijen komen voor wanneer de vraag de capaciteit tot het verlenen van een bediening overschrijdt. Bij toepassing van wachtrij-theorie op verkeersstromen wordt verondersteld dat als c de opstoppingsdichtheid is (afhankelijk van het aantal vakken op de rijbaan, ...) de rijbaan bestaat uit segmenten van gelijke lengte, namelijk $1/c$. Dit laatste komt overeen met de minimale lengte die een voertuig nodig heeft. Men beschouwt nu elk segment als een bedieningsstation waar voertuigen aan tempo λ aankomen en aan tempo μ bediend worden.

Men definieert w als de totale tijd gedurende dewelke een voertuig in het systeem verblijft. Dit is de som van de wachttijd (wegens opstopping) en de bedieningstijd. Indien w gekend is dan kan de snelheid s als volgt berekend worden :

$$s = \frac{1/c}{w}, \quad (2.26)$$

Hierna worden enkele wachtrij-modellen samen met hun veronderstellingen besproken. Deze modellen worden bestempeld met behulp van de Kendall-notatie : drie symbolen gescheiden door schuine strepen. Het eerste symbool geeft aan welke verdeling gebruikt wordt voor de aankomst-tussentijden, het tweede symbool geeft aan welke verdeling gebruikt wordt voor de bedieningstijden en het laatste symbool is een getal dat weergeeft hoeveel bedieningsstations er in het systeem zijn.

2.5.2 Het M/M/1 wachtrij-model

Men veronderstelt dat de aankomst-tussentijden en de bedieningstijden exponentieel verdeeld zijn (= M/M). Het aankomsttempo λ is Poisson-verdeeld met verwachte aankomsttijd $1/\lambda$ [Rou94] ($\lambda = kv_n$ waarbij k de dichtheid en v_n de nominale snelheid van de voertuigen op de rijbaan is). Het bedieningstempo μ is ook Poisson-verdeeld met verwachte bedieningstijd $1/\mu$ [Rou94] ($\mu = cv_n$ waarbij c de opstoppingsdichtheid en v_n de nominale snelheid van de voertuigen op de rijbaan is). Men beschouwt één bedieningsstation (= M/M/1).

Dit levert voor de totale wachttijd w volgende betrekking op :

$$w = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{v_n(c - k)}. \quad (2.27)$$

De overeenkomstige snelheid v is dan :

$$v = \frac{v_n(c - k)}{c} = v_n(1 - \rho), \quad (2.28)$$

waarbij ρ nu de verkeersintensiteit voorstelt :

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{k}{c}. \quad (2.29)$$

De maximale doorstromingsgraad bedraagt :

$$q_{max} = \frac{v_n c}{4}. \quad (2.30)$$

Aan vergelijking 2.28 is te zien dat er een negatieve lineaire relatie bestaat tussen snelheid v en dichtheid k , dit komt overeen met de grafiek in figuur 2.4.

Het M/M/1-model is een interessant basisgeval maar niet geschikt om realistische verkeersstromen voor te stellen. In het volgende deel wordt de aanname dat de bedieningstijden exponentieel verdeeld zijn, verzwakt door te stellen dat ze een algemene verdeling hebben.

2.5.3 Het M/G/1 wachtrij-model

In dit model zijn de aankomst-tussentijden nog steeds exponentieel verdeeld (= M) met aankomsttempo λ dat Poisson-verdeeld is met verwachte aankomsttijd $1/\lambda$ [Rou94] ($\lambda = kv_n$ waarbij k de dichtheid en v_n de nominale snelheid van de voertuigen op de rijbaan is). De bedieningstijden zijn echter algemeen verdeeld (= G) met verwachte bedieningstijd $1/\mu$ ($\mu = cv_n$ waarbij c de opstoppingsdichtheid en v_n de nominale snelheid van de voertuigen op de rijbaan is) en standaardafwijking σ . Men beschouwt weerom één bedieningsstation (= M/G/1).

In dit model bedraagt de totale wachttijd w :

$$w = \frac{1}{kv_n} + \frac{\rho^2 + k^2 v_n^2 \sigma^2}{2kv_n(1 - \rho)}. \quad (2.31)$$

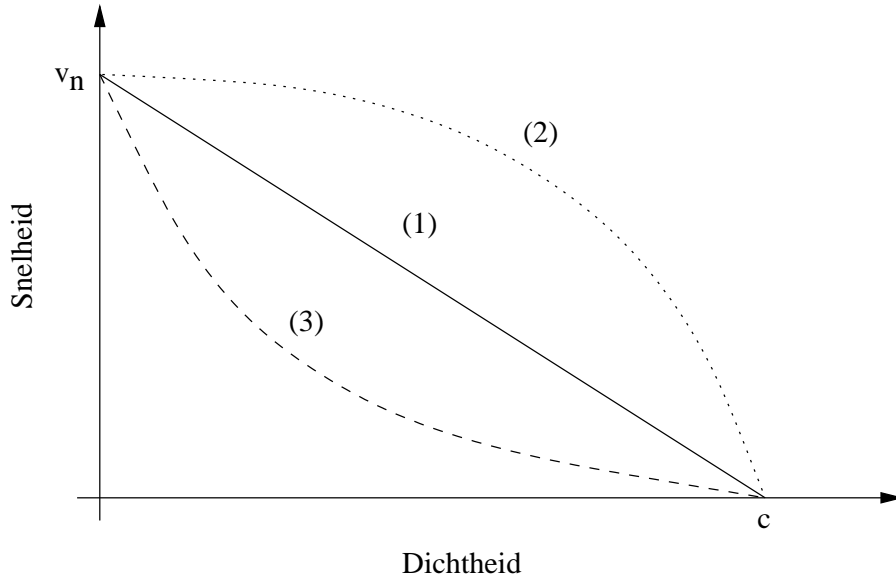
En de overeenkomstige snelheid s is dan :

$$v = \frac{2v_n(1 - \rho)}{2 + \rho(\beta^2 - 1)}, \quad (2.32)$$

waarbij β nu de variatiecoëfficiënt van de bedieningstijd is met $\beta = \sigma v_n c$. In figuur 2.9 zijn de effecten te zien die β op het snelheid-dichtheid diagram kan hebben (bij (1) is $\beta = 1$, bij (2) is $\beta < 1$ en bij (3) is $\beta > 1$).

De maximale doorstromingsgraad bedraagt :

$$\begin{aligned} q_{max} &= 2v_n c \left(\frac{\sqrt{\beta^2 + 1} - \sqrt{2}}{\beta - 1} \right)^2 \quad (als \beta \geq 1) \\ q_{max} &= \frac{v_n c}{4} \quad (als \beta = 1). \end{aligned} \quad (2.33)$$



Figuur 2.9: De grafiek voor de snelheid-dichtheid relatie volgens het M/G/1-wachtrij-model.

2.5.4 Het G/G/1 wachtrij-model

In dit model zijn zowel de aankomst-tussentijden als de bedieningstijden algemeen verdeeld (= G/G) met verwachte aankomsttijd $1/\lambda$, standaardafwijking σ_a en verwachte bedieningstijd $1/\mu$, standaardafwijking σ_s . Men beschouwt weerom één bedieningsstation (= G/G/1).

In dit model bedraagt de totale wachttijd w :

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{1}{v_n c} + \frac{\rho^2 (c_a^2 + c_s^2)}{2k v_n (1 - \rho)} e^{\left(\frac{-2(1-\rho)(1-c_a^2)^2}{3\rho(c_a^2 + c_s^2)} \right)} \quad (\text{als } c_a^2 \leq 1) \\
 w &= \frac{1}{v_n c} + \frac{\rho^2 (c_a^2 + c_s^2)}{2k v_n (1 - \rho)} e^{\left(\frac{-(1-\rho)(c_a^2 - 1)^2}{(1+\rho)(c_a^2 + 10c_s^2)} \right)} \quad (\text{als } c_a^2 > 1), \quad (2.34)
 \end{aligned}$$

met c_a de variatiecoëfficiënt van de aankomst-tussentijden en c_s de variatiecoëfficiënt van de bedieningstijden. De overeenkomstige snelheid v is nu :

$$v = \frac{2v_n(1 - \rho)}{2(1 - \rho) + \rho(c_a^2 + c_s^2)} e^{\left(\frac{-2(1-\rho)(1-c_a^2)^2}{3\rho(c_a^2 + c_s^2)} \right)} \quad (\text{als } c_a^2 \leq 1)$$

$$v = \frac{2v_n(1-\rho)}{2(1-\rho) + \rho(c_a^2 + c_s^2)e^{\left(\frac{-(1-\rho)(c_a^2-1)^2}{(1+\rho)(c_a^2+10c_s^2)}\right)}} \quad (\text{als } c_a^2 > 1). \quad (2.35)$$

In praktijk geven deze vergelijkingen geen expliciete oplossingen, vandaar dat ze numeriek opgelost dienen te worden (met bijvoorbeeld de Newton-Raphson methode).

2.5.5 Het toestandsafhankelijk G/G/1 wachtrij-model

In plaats van een vast bedieningstempo μ wordt dit een functie die afhankelijk is van de doorstromingsgraad q . Dit wil zeggen dat voertuigen bediend worden aan een tempo dat afhankelijk is van het aantal voertuigen in het systeem. We weten dat $\mu = cv_n$, verder stellen we dat $v_n = f(q)$. Voor f kan een lineaire of exponentiële functie genomen worden. De lineaire versie is als volgt :

$$v_{n,q} = v_n \left(\frac{q_{max} + 1 - q}{q_{max}} \right), \quad (2.36)$$

terwijl de exponentiële versie als volgt is :

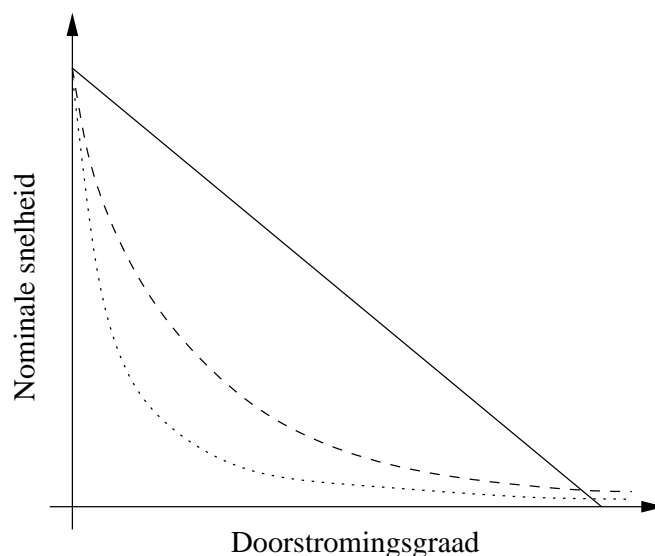
$$v_{n,q} = v_n e^{-a\left(\frac{q}{q_{max}}\right)}, \quad (2.37)$$

waarbij q telkens de doorstromingsgraad is en q_{max} de maximale doorstromingsgraad. De constante a is de drukcoëfficiënt voor de exponentiële functie. Hoe groter a , hoe sneller de nominale snelheid v_n afneemt bij toenemende doorstromingsgraad. De grafiek in figuur 2.10 illustreert dit effect van a op de vorm van de exponentiële functie.

2.5.6 Conclusies

Stroommodellen gebaseerd op wachtrij-theorie zijn pas recentelijk aan het opkomen. Zij bestonden al geruime tijd maar pas de laatste jaren heeft men er werk van gemaakt. Hun toepassingsgebied omvat veel meer dan de vorige stroommodellen. Indien men meerdere bedieningsstations aan elkaar koppelt, kan men complete wegennetwerken beschrijven. Schatten van voertuigemissies gebeurt op bijna triviale wijze.

Het onderzoek dat gebruikt maakt van dit soort modellen zit in de lift : op het UFSIA (Universiteit Antwerpen) heeft men het G/G/1-model toegepast op het



Figuur 2.10: De lineaire en verschillende exponentiële functies voor de nominale snelheid v_n .

verkeer op de E19-autosnelweg (zie 4.3.1 voor meer informatie hieromtrent). Ook voor het schatten van CO -, CO_2 -, NO_x - en VOC^1 -emissies werd dit soort modellen redelijk succesvol gebruikt [WCV00].

2.6 Conclusies

In dit hoofdstuk werden diverse modellen van verkeersstromen besproken. Deze modellen steunen op de drie fundamentele grootheden, snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid, die uitgebreid aan bod kwamen in het vorige hoofdstuk. Het onderzoek naar hun onderlinge verbanden gaf aanleiding tot de ontwikkeling van de empirische stroommodellen. Vanuit een meer theoretisch perspectief werden de continue stroommodellen ontwikkeld die zich baseren op de beschrijving van een vloeistof. Stroommodellen gebaseerd op wachtrij-theorie zijn fundamenteel anders opgebouwd maar leveren dezelfde informatie op als de vorige twee soorten stroommodellen. De macroscopische stroommodellen gaan nog een stapje verder : zij werken met volledige wegennetwerken en proberen de serviceverlening ervan te bepalen. Merk op dat er naast deze soorten stroommodellen nog andere soorten zijn die bijvoorbeeld gebaseerd zijn op CSPs (*constraint satisfaction problems*), vage logica (*fuzzy logic*), expertsystemen, virtuele realiteit, genetische algoritmen,

¹VOC staat voor *volatile organic compounds*, dit zijn vluchtige organische mengsels.

neurale netwerken, ... Het gebruik hiervan is tot op heden echter vrij beperkt.

De besproken modellen zijn theoretisch equivalent met elkaar, een model kan steeds getest worden aan de hand van de verschillende empirische stroommodellen. In praktijk zal men de gemeten data in de welbekende grafieken van de empirische stroommodellen uitzetten om zo een goed beeld te krijgen van de kenmerken van een verkeersstroom. Indien men deze laatste modellen theoretisch gaat gebruiken dan dient men er wel rekening mee te houden dat zij eigenlijk voorbijgestreefd zijn en niet per se meer opgaan voor de huidige toestanden (denk maar aan het 'verkeerdelijk' gebruik van Greenshields' modellen in paragraaf 2.2.1).

Al de tot hier toe besproken modellen zijn macroscopisch van aard : zij beschouwen een verkeersstroom in zijn geheel en beschrijven hem aan de hand van de reeds vermelde fundamentele grootheden (die dan geldig zijn voor de hele verkeersstroom). Er is echter nog een andere manier van werken en die houdt zich bezig op microscopisch niveau, namelijk het modelleren van het rijgedrag van individuele bestuurders. Deze modellen gaan ervan uit dat een verkeersstroom opgebouwd is uit kleine elementen (de voertuigen) die met elkaar in wisselwerking treden. De invloed die zij op elkaar uitoefenen is de kern van de dynamica die een verkeersstroom in zich herbergt en het is de kunst om met zo eenvoudig mogelijke modellen realistische voorspellingen te doen. Het afleiden van macroscopische grootheden zal een stuk moeilijker blijken indien deze nieuwe soort modellen wordt gebruikt.

Hoofdstuk 3

Modellen van bestuurdersgedrag

Inleiding

De in het vorige hoofdstuk besproken stroommodellen beschouwden een verkeersstroom in zijn geheel, op een macroscopische wijze. Als men een verkeersstroom echter van dichtbij beschouwt dan merkt men dat deze opgebouwd is uit vele kleine elementen, namelijk de voertuigen die er deel van uitmaken. Het dynamische karakter van zo'n verkeersstroom zit in de onderlinge wisselwerkingen die de bestuurders van de voertuigen op elkaar uitoefenen. Dit wordt in grote mate bepaald door het rijgedrag van elke bestuurder en de fysieke capaciteiten van elk voertuig. De vorige stroommodellen hielden hier geen rekening mee vermits zij elke grootheid behandelden als een gemiddelde. De stroommodellen in dit deel zijn microscopisch van aard. Telkens men het woord 'bestuurder' in de mond neemt, spreekt men van microscopische stroommodellen (dit wel op voorwaarde dat elke bestuurder apart gemodelleerd wordt).

Dit alles impliceert dat er eerst gekeken dient te worden naar welke menselijke factoren aan de basis van het bestuurdersgedrag liggen. Typisch aan microscopische stroommodellen is dat in de literatuur een overzicht wordt gegeven van welke *mogelijke* menselijke factoren er allemaal zijn. Deze lijst is langs de ene kant zeker niet exhaustief en langs de andere kant dient men steeds voor ogen te houden dat slechts een heel klein deel van deze menselijke factoren effectief in de stroommodellen gebruikt wordt, aangezien anders de complexiteit van deze laatste drastisch zou toenemen.

Daarna worden de stroommodellen besproken die zich enkel baseren op de onderlinge interacties tussen de voertuigen. Deze modellen worden in twee klassen verdeeld : modellen die het volgen van een voertuig beschouwen, de voertuigvolg modellen (*car-following models*), en modellen die het veranderen van vak

beschouwen, de vak-verander modellen (*lane-change models*). Deze modellen worden gebruikt bij het bestuderen van de verkeerssituaties in het illustratieve voorbeeld aan het begin van dit deel.

3.1 Menselijke factoren

Transportsystemen zijn typische mens-machine systemen, de activiteiten in het systeem bestaan uit interacties tussen mensen en interacties tussen mens en voertuig. De regels die deze interacties beschrijven zijn van nature uit benaderend, de observaties en reacties van bestuurders worden geregeerd door de menselijke waarneming en niet door technologie gebaseerd op sensor- en monitorsystemen.

Ondanks de grote vooruitgang die vooral tijdens de laatste jaren werd geboekt, blijven er nog veel vragen over in verband met het modelleren van de menselijke component in de vergelijkingen. Het is dan ook interessant eens na te gaan welke menselijke factoren een rol spelen en hoe zij geïnterpreteerd dienen te worden. Bij de bespreking van de voertuig-volg modellen en de vak-verander modellen zal uiteindelijk blijken dat vele van deze factoren niet in rekening worden gebracht. Niettemin is het belangrijk te beseffen dat deze factoren prominent aanwezig zijn in het dagelijks verkeer, vandaar volgend overzicht.

Dit deel is hoofdzakelijk gebaseerd op [Kop96].

3.1.1 De kunst van het rijden

Lunenfield en Alexander ([Kop96], paragraaf 3.1.1) postuleerden in 1990 dat de kunst van het rijden een hiërarchisch proces is met drie verschillende niveau's : controle, leiding en navigatie.

Controle

Dit niveau omvat alle activiteiten die komen kijken bij de interacties tussen het voertuig en de bestuurder ervan. De meeste van deze activiteiten gebeuren automatisch met slechts een weinig aan bewuste inspanningen : ze zijn gebaseerd op bekwaamheid (*skill-based*).

Leiding

Van zodra een persoon de essentiële zaken om een voertuig te besturen verworven heeft, begint het volgende niveau, leiding, wat op regels gebaseerd (*rule-based*) is.

De hoofdactiviteiten van de bestuurder omvatten nu het behouden van een veilige snelheid en een juiste positie ten opzichte van de rijbaan en andere verkeerselementen. Dit niveau is dynamisch aangezien het voertuig zich over de rijbaan beweegt en telkens in andere situaties terecht komt.

Navigatie

Dit is het hoogste niveau : reisplanning, kaartlezen, ... maken hier deel van uit. Het gedrag is hier op kennis gebaseerd (*knowledge-based*) in tegenstelling tot het gedrag bij het controle-niveau. De belangrijkheid hiervan moet in het oog worden gehouden aangezien dit steeds een grotere rol gaat spelen met de opkomst van Intelligente Transport Systemen.

3.1.2 Waarnemingsreactietijd

Vergeleken met sommige fysische en chemische processen is zelfs de meest eenvoudige menselijke reactie op binnenkomende informatie al redelijk traag. De Nederlandse fysioloog Donders ([Kop96], paragraaf 3.2.1) speculeerde midden 19^e eeuw dat er centrale processen een rol speelden bij de reactietijden bij keuzes en herkenningen. Sindsdien werden er tal van modellen beschouwd. In de vroege jaren '50 speelde informatietheorie een dominante rol in de experimentele psychologie. De volgende lineaire vergelijking was een produkt van deze bloeiperiode :

$$\text{PRT} = a + bH, \quad (3.1)$$

waarbij PRT de reactietijd is (uitgedrukt in seconden, PRT staat voor *perception-reaction time*), H de geschatte verzonden informatie (deze is $\log_2 N$ als er N even waarschijnlijke alternatieven zijn), a de minimale reactietijd voor de situatie en b de empirisch bepaalde richtingscoëfficiënt. Vergelijking 3.1 staat bekend als *de wet van Hick en Hyman* ([Kop96], paragraaf 3.2.1) en drukt een relatie uit tussen het aantal alternatieven dat beschouwd moet worden om over een antwoord te beslissen en de daarmee corresponderende benodigde reactietijd.

Empirische studies toonden aan dat 1,5 s de gemiddelde waarnemingsreactietijd is. Dit is een schatting voor de eenvoudigste reactietijd, namelijk voor de reactie van de bestuurder op een zekere invoer waardoor deze zijn/haar voet van het gaspedaal haalt en het rempedaal induwt. Andere studies relativeerden dit resultaat en gaven waarnemingsreactietijden tot wel 3,0 s op autosnelwegen.

3.1.3 Bewegingstijd

De remreactie van een bestuurder bestaat uit de twee delen : enerzijds is er de waarnemingsreactietijd (zie paragraaf 3.1.2), anderzijds is er direct daaropvolgend de bewegingstijd (MT wat staat voor *movement time*).

In 1954 werd voor het eerst het concept van bewegingstijd bestudeerd en dit gaf aanleiding tot volgende lineaire vergelijking die men *de wet van Fitt* ([Kop96], paragraaf 3.3.1) noemt :

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{2A}{W} \right), \quad (3.2)$$

met a de minimale reactietijd vertraging (er is geen beweging), b de empirisch bepaalde richtingscoëfficiënt (verschillend voor elke ledemaat), A de amplitude van de beweging (dit is de afstand tussen het start- en eindpunt) en W de breedte van het besturingsapparaat. De term

$$\log_2 \left(\frac{2A}{W} \right) \quad (3.3)$$

is de zogenaamde *index van moeilijkheid* en wordt uitgedrukt in binaire eenheden (wat een direct verband toelaat met vergelijking 3.1, namelijk de wet van Hick en Hyman).

Alternatieve formuleringen van de wet van Fitt laten de breedte van het besturingsapparaat weg wat aanleiding geeft tot volgende vergelijking :

$$MT = a + b\sqrt{A}. \quad (3.4)$$

Hierin zijn a en b empirisch afgeleide parameters, ze worden onder andere beïnvloed door leeftijd en conditie van de bestuurder. Het grootste deel van het onderzoek hieromtrent hield zich hoofdzakelijk bezig met hand- en armreacties. Vanaf 1975 werd de wet van Fitt ook toegepast op benen en voeten, met opmerkelijk goede resultaten. Het bleek dat deze wet op alle ledematen van het menselijk lichaam toepasbaar was.

3.1.4 Zichtbaarheid

Het rijproces is sterk visueel van aard : externe informatie die we door de voorruit waarnemen omvat bijna alle informatie die moet verwerkt worden. Van belang

hierbij is de afstand tot verkeerscontrole-apparaten (verkeersborden, verkeerslichten, ...) en het waarnemen van die apparaten. Twee verschillende aspecten spelen hierbij een rol : enerzijds het *zien* van zaken en anderzijds het *begrijpen* van die zaken.

Reactietijden voor visuele informatie zijn afhankelijk van de visuele hoek waaronder de informatie waargenomen wordt. Deze hoek wordt als volgt berekend :

$$\text{visuele hoek} = 2 \operatorname{Bgtg} \left(\frac{L}{2D} \right), \quad (3.5)$$

met L de diameter van het doel waarnaar men kijkt (meestal een letter of een symbool) en D de afstand tot dat doel (uitgedrukt in dezelfde eenheden). Twee objecten met dezelfde visuele hoek wekken dezelfde reactie op bij een menselijke waarnemer.

Andere factoren die bij zichtbaarheid een rol spelen zijn de extrapolatie (afgaande op een deel van een signaal, verkeersbord, ... kan men de rest er al van raden), complexiteit van een signaal (ingewikkelde verkeersborden, te lange teksten, onduidelijke structuur, ...) en de tijd nodig om bijvoorbeeld verkeersborden te lezen *en* te begrijpen.

3.1.5 Reactie op andere voertuigen

De voertuigen in een verkeersstroom zijn discrete elementen die ‘losjes’ gekoppeld zijn met elkaar via het verwerken van de informatie door de bestuurders. De effecten die veranderingen van snelheid, versnelling of andere elementen met zich meebrengen worden waargenomen en daarop reageren bestuurders. Het blijkt dat twee situaties te onderscheiden zijn : het voertuig voorop en het voertuig langs zij.

Het voertuig voorop

Beschouwing van het voertuig voorop heeft zijn basis voor drempels voor het waarnemen van radiale beweging. Deze beweging is de verandering in de waargenomen grootte van een object. De minimale conditie voor het waarnemen van de radiale beweging van een object voorop is de symmetrische vergroting van een vorm of textuur in het frontale gezichtsveld van de bestuurder. De visuele hoek verandert als een object dichterbij komt en op een gegeven moment zal het waarnemingssysteem een waarschuwing – ‘een object zal botsen met het voertuig van de waarnemer’ of omgekeerd ‘een object beweegt zich van de waarnemer af’ – teweegbrengen. Dit fenomeen wordt opdoeming (*looming*) genoemd.

De menselijke visuele waarneming van de versnelling van een object is zeer grof en niet accuraat. Het is zeer moeilijk voor een bestuurder om versnelling te onderscheiden van een constante snelheid tenzij het object voor een lange tijd (10 tot 15 seconden) waargenomen wordt.

Het voertuig langsij

De waarneming van beweging in het perifere gezichtsveld is normaal minder scherp dan waarneming van beweging in het frontale gezichtsveld. Anders geformuleerd : een grotere relatieve snelheid is nodig om de snelheidsverandering door een bestuurder (die juist uit de hoeken van zijn/haar ogen kijkt) waargenomen te worden. Langs de andere kant is het perifere gezichtsveld zeer vervaagd wat maakt dat een bewegend object dan ook meer opvallend is dan een stilstaand object : een object dat zich langsij met dezelfde snelheid voortbeweegt heeft de neiging te ‘verdwijnen’ (tenzij het zich voortbeweegt tegen een gecontrasteerde achtergrond zoals patronen, ...).

3.1.6 Individuele verschillen in de performantie van bestuurders

De term ‘individuele verschillen’ duidt op zaken zoals geslacht, leeftijd, opleiding, gezondheid, Slechts enkele hiervan zijn van belang bij het modelleren van verkeersstromen. De volgende individuele verschillen beïnvloeden direct het pad dat een voertuig volgt en de snelheid dat het heeft :

- geslacht,
- leeftijd,
- alcohol en andere drugs
- en medische gezondheid.

Geslacht

Onderzoek verricht in 1994 door Kroemer, Kroemer en Kroemer-Ebert ([Kop96], paragraaf 3.7.1) toonde aan dat relevante verschillen bij verschillende geslachten minimaal tot niets zijn. In fijne vingerhandigheid en kleurherkenning blijken de vrouwen beter te zijn, mannen hebben daarentegen een voordeel wat snelheid betreft. Reactietijden schijnen iets langer te zijn voor vrouwen dan voor mannen.

Deze verschillen zijn dus wel statistisch maar praktisch gezien *niet* significant. Verschil in performantie tussen mannen en vrouwen kan in de modellen dan ook genegeerd worden¹.

Leeftijd

Alhoewel een aantal aspecten van de menselijke performantie het rijgedrag een verandering laten ondergaan met het ouder worden, blijkt dat deze uiterst variabel zijn en dus is leeftijd een slechte maat voor performantie. Eén uitzondering hierop wordt echter gevormd door de visuele waarneming. Bij het grootste deel van de mensen gaat visuele performantie met de jaren achteruit, een proces dat versnelt wanneer men ongeveer de leeftijd van 50 jaar heeft bereikt.

Volgende zaken werden na onderzoek opgemerkt :

- verkleining van het frontale gezichtsveld,
- contrastherkenning in het donker verzwakt drastisch,
- herstellen van de schittering van een koplamp van een tegenligger gebeurt veel langzamer (men rijdt gedurende ettelijke seconden ‘blind’),
- objectherkenning neemt af (vooral in tijden van stress) waardoor bestuurders verkeersborden, ... te laat opmerken,
- er treden problemen op bij het onderscheiden van irrelevante informatie en belangrijke aanwijzingen (de filtering gebeurt niet meer efficiënt),
- bestuurders krijgen problemen bij het volgen van het tempo op autosnelwegen in stress-omstandigheden. Ze proberen dan te compenseren door trager te gaan rijden wat beter voor hun is omdat ze dan hun eigen tempo kunnen controleren (dit kan wel resulteren in een opstopping die het verkeer ophoudt),
- de oude bestuurders van morgen zijn niet die van vandaag. Vroeger reden er minder mensen ; de huidige bestuurders genoten daarentegen een degelijke theoretische en praktische rijopleiding, een deel van hen heeft zelfs defensief autorijden gevolgd. Ze zijn vertrouwd met de huidige verkeerscondities (opstoppingen en dergelijke) wat maakt dat ze hun rijstijl wellicht in de loop van de jaren niet meer zullen wijzigen.

¹Desondanks zijn veel mensen, die niet met dit soort onderzoek bezig zijn, sterk de mening toegedaan dat er wel degelijk een verschil is !

Alcohol en andere drugs

Alcohol, al dan niet in combinatie met andere drugs, heeft meestal een schadelijk effect op de performantie van een bestuurder. Algemeen geldt dat de reactietijden en cognitieve verwerkingstijden verlengen. Paradoxaal genoeg kunnen sommige drugs bij sommige bestuurders juist een verbetering teweegbrengen. Er worden nog steeds volledige studies gewijd aan de reactie van een bestuurder in het verkeer, onder invloed van alcohol.

Medische gezondheid

Studies hebben aangetoond dat mindervaliden die een voertuig bestuderen geen extra effect op een verkeersstroom hebben, zij dienen dus niet expliciet gemodelleerd te worden. Dit komt grotendeels ook door het feit dat met de technologische vooruitgang er ontwikkelingen gedaan worden die het rijcomfort van zulke mensen verbeteren en het rijden meer mogelijk maken.

3.1.7 Andere factoren

Vermits een bestuurder deelneemt aan een dynamisch systeem, het verkeer, zijn er nog tal van factoren die in de loop van de jaren onderzocht werden. Enkele daarvan zijn : het stuurvermogen (dit is direct gerelateerd aan het volgen van een object), remperformantie (gaande van het inschatten en bepalen van remafstanden tot het gedrag van een bestuurder bij het ‘alles dichtslaan’, het remmen op een nat wegdek, slipcontrole, . . .), versnellingscontrole (hoe gedraagt een bestuurder zich in een bepaald type voertuig met bepaalde specifieke karakteristieken ?), de reactie op een snelheidsbeperking, de reactie op afleidingen aan de kant van de rijbaan wat aanleiding kan geven tot artificiële opstoppingen, de agressie van bestuurders, het gedrag bij het veranderen van vak (cfr. middenvakrijders), . . .

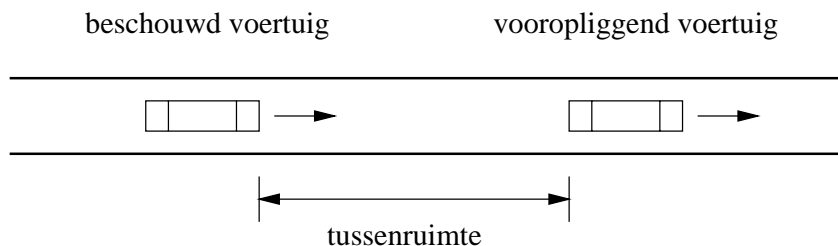
3.1.8 Conclusies

In dit deel werd gekeken naar de verschillende menselijke factoren die van belang zijn tijdens het besturen van een voertuig. Het concept ‘reactietijd’ speelde daar een centrale rol in. Er werd een beschouwing gegeven over het gezichtsveld dat voor de bestuurder de belangrijkste bron van de te verwerken informatie vormt. Ook werd aandacht besteed aan de verschillende vormen van informatie waarmee de bestuurder via het visuele systeem wordt geconfronteerd . Tot slot werden enkele andere factoren – zoals geslacht, leeftijd, . . . – besproken.

In de volgende delen wordt ingegaan op de mogelijke wiskundige formuleringen van het proces van voertuig-besturing. Het doel is om met een zo *eenvoudig* mogelijk model een zo *realistisch* mogelijke nabootsing van de werkelijkheid te geven. Dit brengt met zich mee dat men onmogelijk alle in dit deel besproken menselijke factoren in rekening kan brengen aangezien dit de complexiteit van de wiskundige modellen sterk zou doen toenemen. Wat men wel kan doen is deze menselijke factoren proberen te meten door middel van experimenten en de resultaten daarvan gebruiken in de wiskundige modellen (voor bijvoorbeeld kalibratie van een model).

3.2 Voertuig-volg modellen (*car-following models*)

In paragraaf 3.1.1 werd al eens kort ingegaan op de zaken die komen kijken bij het besturen van een voertuig. Al is rijden één van de meest frequent uitgevoerde taken, toch heeft men de werking ervan nog niet volledig doorgrond. Dit deel richt zich op één specifiek geval : *het volgen van een voertuig*. Deze taak is relatief eenvoudig vergeleken met de andere taken die een rol spelen bij het rijden en ze vormt een essentieel deel bij de microscopische beschouwing van een verkeersstroom.



Figuur 3.1: Het volgen van een voertuig.

De voertuig-volg modellen vormen samen met de vak-verander modellen de basis van microscopische verkeerssimulators, ze maken deel uit van het hart van de ontwikkelde simulator, *Mitrasim 2000*. In het bijzonder zullen de voertuig-volg modellen het versnellingsgedrag van een voertuig omvatten dat waarneembaar is wanneer dit voertuig een ander voertuig volgt.

Dit deel is gebaseerd op [Kou99b], [Rot96] en [Ahm99].

3.2.1 Gemiddelde tussenruimte

Een interessant aspect aan het volgen van een voertuig is de gemiddelde tussenruimte S die een voertuig laat met zijn voorligger (gegeven een zekere snelheid

V). Het belang van de relatie tussen S en V is gerelateerd aan het feit dat bijna alle schattingen van de capaciteit van 1 vak op een rijbaan vroeger gebaseerd werden op de volgende vergelijking :

$$C = 1000 \cdot \frac{V}{S}, \quad (3.6)$$

met C de capaciteit van 1 vak (uitgedrukt in voertuigen per uur), V de snelheid (uitgedrukt in km/uur) en S de gemiddelde tussenruimte (gemeten van achterbumper tot achterbumper).

Tussen 1924 en 1941 werden 23 experimenten ([Rot96], hoofdstuk 4) verricht om een relatie tussen S en V te identificeren opdat schattingen van de capaciteit van 1 vak op een rijbaan zouden gedaan worden. Volgende vergelijking gaf een goed resultaat :

$$S = \alpha + \beta V + \gamma V^2, \quad (3.7)$$

waarbij de modelparameters volgende fysische interpretatie hebben : α is de effectieve voertuiglengte L , β is de reactietijd T en γ is de reciproke van twee keer de maximaal gemiddelde afremming van een volgend voertuig. De laatste term in vergelijking 3.7 zorgt voor voldoende tussenruimte in het geval het voorliggend voertuig tot een plotse stop komt zodat het direct daarop volgende voertuig nog volledig kan stoppen zonder een botsing te veroorzaken.

Dit model is toepasbaar in het geval elk voertuig in de verkeersstroom ongeveer dezelfde constante snelheid en dezelfde tussenruimte probeert aan te houden.

3.2.2 Modelontwikkeling

De voertuig-volg modellen voor een enkel vak van een rijbaan gaan ervan uit dat er een correlatie tussen voertuigen is (met tussenruimtes variërend van 0 tot ongeveer 125 meter). Ze geven ook een expliciete vorm aan deze koppeling. Er wordt verondersteld dat elke bestuurder in een volgend voertuig een actief en voorspelbaar element is in het bestuurder-voertuig-rijbaan systeem. De relatief simpele taak van het volgen van een voertuig (sturen, routing, ... kunnen genegeerd worden) kan opgesplitst worden in drie delen :

Waarneming : een bestuurder verzamelt allerlei relevante informatie hoofdzakelijk via het visuele kanaal. Deze informatie komt voornamelijk van de beweging van het voertuig zelf en het voertuig voorop. Extra gegevens omvatten de snelheid, versnelling en hogere afgeleiden (zoals de mate van agressie), tussenruimte, ...

Nemen van een beslissing : een bestuurder interpreteert de in de tijd bekomen informatie en integreert deze over de tijd. De interpretatie geschiedt aan de hand van kennis over de karakteristieken van het voertuig en een uitgebreid repertorium van rij-ervaring. Dit levert de automatische ontwikkeling van rijmethodes op waaruit dan de rijbekwaamheid evolueert.

Controle : een bekwame bestuurder kan dan controle op het voertuig uitoefenen dankzij zijn/haar handigheid, vlotheid en coördinatievermogen, daarbij telkens berustend op de terugkoppeling (*feedback*) van zijn/haar eigen reacties die direct gerelateerd zijn aan de voorligger en de rijbaan.

Het is niet helemaal duidelijk hoe een bestuurder al deze taken in detail uitvoert, maar de miljoenen kilometers die jaarlijks worden gereden dragen bij tot het feit dat met weinig of geen oefening bestuurders een veelheid aan complexe rijtaken aankunnen.

3.2.3 De wiskundige basis

Voertuig-volg modellen brengen niet expliciet de in paragraaf 3.1 besproken factoren in rekening aangezien dit tot veel te complexe modellen zou leiden wat indruist tegen de in paragraaf 3.1.8 gestelde conditie, namelijk dat het model zowel eenvoudig als realistisch moet zijn. In plaats daarvan veronderstelt men dat er een stimulus-respons relatie bestaat die het proces van het rijden met een voertuig beschrijft :

$$\text{respons} = \lambda \cdot \text{stimulus}, \quad (3.8)$$

met λ een evenredigheidsconstante. De bestuurder reageert (respons) dus op situaties (stimulus) en deze stimulus-functie bestaat uit vele factoren : snelheid, relatieve snelheid, tussenruimte, versnelling, voertuigperformantie, karakteristieken van de bestuurder, ...

De vraag die men zich nu stelt is de volgende : welke factoren zijn belangrijk en welke factoren kunnen genegeerd worden (waarbij het model nog steeds geldig is) ? Meestal worden in deze modellen de aannames gemaakt dat de bestuurder probeert om bij het vooropliggend voertuig te blijven en dat botsingen worden vermeden. Om dit te bewerkstelligen dient de bestuurder een kleine gemiddelde relatieve snelheid aan te houden gedurende korte periodes, of anders geformuleerd :

$$\langle U_l - U_f \rangle = \langle U_{rel} \rangle = \frac{1}{\delta t} \int_{t-\frac{\delta t}{2}}^{t+\frac{\delta t}{2}} U_{rel}(t) dt, \quad (3.9)$$

moet klein blijven (U_l is de snelheid van het vooropliggend voertuig, U_f is de snelheid van het volgend voertuig). Deze conditie zorgt er op zijn beurt dan voor dat de botsingstijden :

$$t_c = \frac{S(t)}{U_{rel}}, \quad (3.10)$$

groot blijven (t_c staat voor *collision time*) en de tussenruimtes niet opmerkelijk vergroten gedurende de periode δt .

Indien we nu de reactietijd van de bestuurder in rekening wensen te brengen dan herformuleren we vergelijking 3.8 als volgt :

$$\text{respons}(t + \tau) = \lambda \cdot \text{stimulus}(t), \quad (3.11)$$

waarbij τ de reactietijd voorstelt.

Op het einde van de jaren '50 werd volgende algemene vorm van voertuig-volg modellen voorgesteld ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) waarin de respons van de bestuurder afhankelijk is van een stimulus en een gevoeligheid voor deze stimulus :

$$\text{respons}_n(t) = \text{gevoeligheid}_n(t - \tau_n) \times \text{stimulus}_n(t - \tau_n), \quad (3.12)$$

waarbij t het tijdstip van observatie is en τ_n de reactietijd van bestuurder n .

Wat is nu eigenlijk de respons ? Men neemt aan dat de respons van een bestuurder de versnelling is. De bestuurder van het voertuig heeft daar immers directe controle over daar zijn voeten de pedalen bedienen die de versnelling van het voertuig regelen. Hij krijgt ook terugkoppeling van deze variabele door de inertiekrachten die op het voertuig worden uitgeoefend.

De reactietijd, τ_n , omvat zowel de waarnemingsreactietijd (de tijd tussen het vertonen van de stimulus en het moment dat de voeten van de bestuurder beginnen te bewegen) als de bewegingstijd (de tijd nodig om de voeten van de bestuurder te bewegen).

Vergelijking 3.12 in het achterhoofd houdend, beschouwt men de relatieve snelheid als de stimulus en is de gevoeligheid een evenredigheidsfactor die een functie is van de snelheid van het voertuig, de tussenruimte, ...

In 1958 ontwikkelde Chandler ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) het eerste voertuig-volg model. Het is een simpel lineair model dat wiskundig als volgt kan uitgedrukt worden :

$$a_n(t) = \alpha \Delta V_n^{voorligger}(t - \tau_n), \quad (3.13)$$

met

$$\begin{aligned} a_n(t) & : \text{ de versnelling die het voertuig van bestuurder } n \\ & \text{ ondergaat op het tijdstip } t, \\ \alpha & : \text{ een evenredigheidsconstante (de gevoeligheid),} \\ \Delta V_n^{voorligger}(t - \tau_n) & = [V_n^{voorligger}(t - \tau_n) - V_n(t - \tau_n)] : \text{ de stimulus,} \\ V_n(t - \tau_n) & : \text{ de snelheid van het voertuig van bestuurder } n \text{ op} \\ & \text{ tijdstip } (t - \tau_n), \\ V_n^{voorligger}(t - \tau_n) & : \text{ de snelheid van het voertuig van de bestuurder die} \\ & \text{ voor het voertuig van bestuurder } n \text{ op tijdstip } (t - \tau_n) \\ & \text{ rijdt.} \end{aligned}$$

Een bestuurder zal nu reageren op de stimulus, die zich manifesteerde op tijdstip $(t - \tau_n)$, door een versnelling te gebruiken op tijdstip t . Dezelfde gevoeligheid wordt gebruikt voor zowel versnellen als vertragen. Dit model werd geschat door middel van een experiment waarin 8 verschillende bestuurders gedurende een twintigtal minuten in testvoertuigen dienden rond te rijden op een rijbaan met twee vakken. Het bleek dat de beste correlatie tussen model en werkelijkheid optrad bij $\alpha = 0,37 \text{ s}^{-1}$ en $\tau_n = 1,5 \text{ s}$.

Een grote beperking van het zojuist besproken model is de veronderstelling van een constante gevoeligheid in alle situaties (dus voor zowel versnellen als vertragen). Gazis ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) loste dit op door de tussenruimte mee in rekening te brengen wat leidde tot volgend model :

$$a_n(t) = \frac{\alpha}{\Delta X_n(t - \tau_n)} \Delta V_n^{voorligger}(t - \tau_n), \quad (3.14)$$

waarbij $\Delta X_n(t - \tau_n)$ de tussenruimte op tijdstip $(t - \tau_n)$ voorstelt (zie figuur 3.1). Na schatting van het model bleek dat α varieerde tussen 29,5 km/u en 44,1 km/u, τ_n varieerde tussen 1,2 s en 1,5 s.

Later, in 1961, toonde Edie ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) aan dat vergelijking 3.14 aan twee beperkingen leed : de theorie van het volgen van de voorligger gaat niet op voor lage dichtheden en in de macroscopische snelheid-dichtheid relatie die men eruit kan afleiden zal de snelheid naar oneindig divergeren als de dichtheid naar nul nadert. Dit laatste kan als volgt aangetoond worden :

Stel, v is de snelheid van een verkeersstroom bij dichtheid k , c is een integratieconstante en k_j is de opstopingsdichtheid. Als men aanneemt dat het verkeer zich in een stabiele toestand bevindt (er zijn dus geen opmerkelijke snelheidsveranderingen) en men de reactietijd verwaarloost dan kan men beide leden van vergelijking 3.14 integreren :

$$\begin{aligned}
\int a \, dt &= \int \frac{\alpha}{\Delta X} \Delta V \, dt \\
\Rightarrow v &= c + \alpha \ln(\Delta X) \\
\Rightarrow v &= c + \alpha \ln\left(\frac{1}{k}\right) \\
\text{als } k &= k_j \text{ en } v = 0 \Rightarrow c = \alpha \ln(k_j) \\
\Rightarrow v &= \alpha \ln\left(\frac{k_j}{k}\right). \tag{3.15}
\end{aligned}$$

In vergelijking 3.15 komt α overeen met de stroomsnelheid bij maximale doorstromingsgraad. Deze vergelijking is de macroscopische snelheid-dichtheid relatie zoals ze ontwikkeld werd door Greenberg in 1959 (zie vergelijking 2.4). Ze geeft echter niet de snelheid van vrij verkeer als de dichtheid nul is.

Edie ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) loste deze twee problemen op door de gevoeligheid te veranderen waardoor het model als volgt werd :

$$a_n(t) = \alpha \frac{V_n(t - \tau_n)}{\Delta X_n(t - \tau_n)^2} \Delta V_n^{\text{voorligger}}(t - \tau_n). \tag{3.16}$$

De gevoeligheid is nu recht evenredig met de snelheid en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de tussenruimte.

Op basis van Gazis vergelijking 3.14 werd het zogenaamde *General Motors Non-Linear Model* ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) ontwikkeld. Dit is het meest algemene en de wiskundige vertaling van het model is als volgt :

$$a_n(t) = \alpha \frac{V_n(t - \tau_n)^\beta}{\Delta X_n(t - \tau_n)^\gamma} \Delta V_n^{\text{voorligger}}(t - \tau_n), \tag{3.17}$$

waarbij α , β en γ modelparameters zijn. De gevoeligheid is hier recht evenredig met de snelheid tot de macht β en omgekeerd evenredig met de tussenruimte tot de macht γ . De parameter α is een constante en de relatieve snelheid is de stimulus. De macroscopische snelheid-doorstromingsgraad relatie van Greenshields

kan afgeleid worden door $\beta = 0$ en $\gamma = 2$ te nemen. Er werd echter nog geen rigoureuze methode ontwikkeld om het model te schatten. Pas in 1993 schatte Ozaki ([Ahm99], paragraaf 2.1.1) de parameters van dit model door middel van regressie-analyse.

Een latere variant van het *GM-model* incorporeerde ook de snelheden van meerdere voertuigen die voor het voertuig van de bestuurder rijden. Dit model werd evenwel niet geschat of gevalideerd.

3.2.4 Algemene voertuig-volg modellen

Het is belangrijk om weten dat de in paragraaf 3.2.3 besproken modellen enkel toepasbaar zijn indien de bestuurder zich in het *voertuig-volg regime* bevindt. Als de tussenruimte immers groot is dan proberen bestuurders niet meer hun voorligger te volgen maar gaan ze proberen hun gewenste snelheid te bereiken. Dit wordt het vrij-stromend regime genoemd. Beide situaties dienen juist gemodelleerd te worden om een realistisch microscopisch simulatiemodel te ontwikkelen.

In 1981 heeft Gipps ([Ahm99], paragraaf 2.1.2) geprobeerd dit te bewerkstelligen door in zijn model de maximale versnelling voor een bestuurder te berekenen zodat de snelheid van zijn voertuig niet de gewenste snelheid van de bestuurder overschrijdt. Tegelijk hield hij er ook rekening mee dat bestuurders op een veilige afstand van hun voorligger volgen.

Benekohal en Treiteren ([Ahm99], paragraaf 2.1.2) ontwikkelden in 1988 een voertuig-volg model dat in staat is voertuigen te beschrijven in zowel vrij verkeer als opgestopt verkeer (waar golven van stoppende en vertrekkende voertuigen in waar te nemen zijn). De versnelling voor een voertuig werd berekend voor vijf verschillende situaties (het nog niet bereikt hebben van de gewenste snelheid, het bereikt hebben van de gewenste snelheid, juist gestopt zijn en terug vertrekken, het behouden van een veilige afstand met de voorligger en het vermijden van botsingen met deze voorligger) waarna de meest bindende werd geselecteerd.

In 1996 werkten Yang en Koutsopoulos ([Ahm99], paragraaf 2.1.2) aan een algemeen model dat gebruikt werd in MITSIM. In deze microscopische verkeerssimulator bevindt een voertuig zich in één van volgende drie toestanden al naargelang de tussenruimte met zijn voorligger :

- het noodtoestand regime, als de tussenruimte kleiner is dan een zekere ondergrens,
- het voertuig-volg regime, als de tussenruimte groter is dan een zekere ondergrens maar kleiner dan een zekere bovengrens

- en het vrij-stromend regime, als de tussenruimte groter is dan een zekere bovengrens.

In het eerste regime zal een bestuurder de nodige vertraging toepassen om botsing met zijn voorligger te voorkomen. Het in paragraaf 3.2.3 besproken *GM-model* wordt gebruikt voor het tweede regime. Er worden verschillende parameters gebruikt voor versnelling en vertraging. In het derde regime wordt een maximale versnelling toegepast wanneer de snelheid lager is dan de gewenste snelheid. Indien deze hoger is dan de gewenste snelheid wordt een normale vertraging toegepast. Zie 4.3.3 voor meer details over de werking van MITSIM.

3.2.5 Modelvalidatie en schatten van parameters

Men dient zich ervan te verzekeren dat de ontwikkelde modellen vrij realistisch zijn. Dit kan men bevestigen indien de modellen een goede benadering vormen voor éénvakverkeer. De experimenten hiertoe verricht situeren zich op twee vlakken :

- het onderling vergelijken van verschillende voertuig-volg modellen en het verrichten van gedetailleerde metingen van de variabelen in deze modellen. Deze vergelijkingen leiden tot een kwantitatieve maat voor het schatten van specifieke parameters in die modellen.
- Het meten van macroscopische grootheden (snelheid, dichtheid en doorstromingsgraad) en hun onderlinge relaties.

De eerste experimenten die werden uitgevoerd dateren van eind de jaren '50 ([Rot96], paragraaf 4.4.1). Ze werden hoofdzakelijk uitgevoerd met één, twee en soms drie voertuigen. Ook werden metingen in tunnels met slechts twee rijvakken (één voor elke rijrichting) verricht.

Macroscopische validatie wordt als volgt gedaan : eerst worden macroscopische grootheden van een verkeersstroom gemeten en vervolgens worden deze uit de microscopische modellen afgeleid. Men kan dan lineaire regressie toepassen om de correlatiecoëfficiënten te berekenen die een indicatie geven van hoe goed een model bij de werkelijkheid aansluit. De parameters kunnen geschat worden door middel van kleinste-kwadraten technieken.

Het meten van reactietijden kan op verschillende manieren gebeuren. Men kan personen onderwerpen aan testen waarin ze zich in een simulator bevinden en bijvoorbeeld het rempedaal moeten induwen van zodra ze de rode stoplichten van

een voorligger zien aanflitsen, een geluidssignaal horen, ... In 1995 liet Lerner ([Ahm99], paragraaf 2.1.3) 56 bestuurders onderwerpen aan een test waarin ze op een rijbaan dienden te rijden. De bestuurders waren echter niet ingelicht over het feit dat ze deelnamen aan een test die reactietijden met wat correctere resultaten zou opleveren. Wanneer een bestuurder de plek van meting bereikte werd een grote gele ton voor het voertuig van de bestuurder gecatapulteerd (om veiligheidsredenen hing de ton wel vast aan een ketting). De reactietijd werd berekend als de tijd tussen het loslaten van de ton en het door de bestuurder indrukken van het rempedaal.

3.2.6 Automatische voertuig-volg modellen

De besprekingen in de vorige delen gingen allen over het manueel volgen van een voertuig. Parallel daarmee werden ook ontwikkelingen gedaan die poogden om dit gedrag automatisch na te bootsen. Op de wereldtentoonstelling van 1939 presenteerde General Motors ([Rot96], paragraaf 4.5) hun visie op geautomatiseerde autosnelwegen waar de voertuigen zowel longitudinaal als lateraal gecontroleerd werden. De bestuurders zouden dan verlost worden van deze taak waardoor er meer vrije tijd voor hen zou vrij komen terwijl ze aan hoge snelheden hun bestemming naderden.

Men heeft zeer veel aandacht aan dit concept besteed. Dit is vooral te wijten aan het grote economische voordeel dat eruit te putten is, de capaciteit van autosnelwegen kan immers beter en efficiënter benut worden. Dit laatste is dan vooral van toepassing op gebieden waar het toevoegen van een extra rijbaan geen sinecure is. Een ander pluspunt is dat de algemene veiligheid verhoogd kan worden.

Belangrijk is dan wel dat het systeem dat men zal gebruiken integer is en geen onverwacht of incorrect gedrag vertoont, zoiets zou immers de veiligheid van de passagiers in gevaar kunnen brengen. Tot nog toe is er enkel nog maar theoretisch werk verricht en pas de laatste jaren begint men hier en daar praktische experimenten uit te voeren. Het zal nog enige tijd duren vooraleer deze geautomatiseerde systemen hun weg naar het dagelijks verkeer vinden.

3.2.7 Conclusies

Historisch gezien is de laatste 40 jaar de wetenschap van de voertuig-volg modellen geëvolueerd van conceptuele ideeën tot wiskundige beschrijvingen. De modellen werden door middel van de verschillende empirische testen verfijnd en geëvalueerd. Dit heeft als verder gevolg dat men beter werk kan gaan maken van de geautomatiseerde concepten.

Het toepassingsdomein strekt zich steeds maar verder en verder uit zodat wetenschappers, werkend aan gerelateerde verkeersstudies, gestimuleerd worden om de vruchten te plukken van de reeds geboekte resultaten.

Een belangrijk feit dat men wel in gedachten moet houden is dat veel van de besproken modellen niet volledig gevalideerd werden en hun parameters niet zuiver geschat werden. Het ontbreekt nog aan statistisch rigoureuze methodes die toegepast kunnen worden. Meestal werden, na constructie van de modellen, de parameters intuïtief geschat en in een paar gevallen geverifieerd aan de hand van empirische experimenten. Toch is het zo dat de laatste tien jaar er meer aandacht aan dit laatste werd besteed, onderzoekers gaan zich berusten op statistische tests alvorens uitspraken over hun modellen te doen.

3.3 Vak-verander modellen (*lane-change models*)

De in paragraaf 3.2 besproken wiskundige modellen richtten zich op één specifieke taak : het volgen van een voertuig in een verkeersstroom. Men kan dit voorstellen als voertuigen die in een rij achter elkaar rijden, bijvoorbeeld zoals op een rijbaan met twee vakken, één voor elke rijrichting. In dit deel wordt een stap verder gegaan : nu worden ook de voertuigen langsrij in rekening gebracht. Meer bepaald wordt besproken waarom een bestuurder van vak zou veranderen, wat dit eigenlijk inhoudt en wat de gevolgen hiervan zijn.

Dit deel is gebaseerd op [Kou99b], [TB96] en [Ahm99].

3.3.1 Het hart van vak-verander modellen

De basis waarop de vak-verander modellen steunen is het opening-aanvaardingsgedrag (*gap acceptance behaviour*). Dit gedrag is een belangrijke fase in het beslissen of de bestuurder al dan niet van vak wil veranderen. Het komt erop neer dat de bestuurder wacht tot er een veilige opening wordt gevormd in het vak naast hem zodat hij zich bij die naburige verkeersstroom kan voegen. Zo'n opening kan ruimtelijk beschouwd worden, in dat geval baseert men zich op de lengte ervan. Men kan deze opening echter ook in de tijd beschouwen waardoor de lengte ervan eigenlijk overeenkomt met de tussentijd tussen de twee voertuigen die de opening vormen.

3.3.2 Enkele ontwikkelde modellen

In 1986 stelde Gipps ([Ahm99], paragraaf 2.2) een vak-verander model voor dat gebruikt kon worden in microscopische verkeerssimulators. Het model werd ontwikkeld om verschillende stedelijke verkeerssituaties – waarbij verkeerslichten, hindernissen en de aanwezigheid van zwaar verkeer een rol speelden – te beschrijven. Hij beschouwde drie belangrijke factoren in tijdens het veranderen van vak, namelijk (1) de noodzaak, (2) de wenselijkheid en (3) veiligheid bij het overwegen voor het veranderen van vak. Hij gaf geen formele schatting van zijn modelparameters.

In 1988 zag CORSIM ([UF99] en [Ahm99], paragraaf 2.2) het licht. Dit programma, ontwikkeld door het FHWA (*Federal Highway Administration*), maakt gebruik van twee componenten : FREESIM en NETSIM. De eerste component simuleert autosnelwegen en de tweede component simuleert stadsverkeer. In CORSIM wordt een vakverandering geklasseerd als verplicht (MLC of *mandatory lanechange*) of als vrijwillig (DLC of *discretionary lanechange*). Een bestuurder voert een MLC uit als hij van vak *moet* veranderen (om bijvoorbeeld een afrit te nemen om uiteindelijk tot zijn bestemming te geraken) terwijl hij een DLC uitvoert indien hij waarneemt dat hij zijn snelheid kan verhogen door in een ander vak te rijden (merk op dat een verandering van vak bij een DLC niet strikt noodzakelijk is). De noodzaak of wenselijkheid om van vak te veranderen wordt bepaald door het berekenen van een risicofactor die aanvaardbaar is voor de bestuurder.

CORSIM is een commercieel produkt dat kan gebruikt worden voor evaluatie van traditionele en geavanceerde verkeersbeheer systemen en strategieën, alternatieven bij geometrische ontwerpen en het effect op korte en lange termijn van ongevallen en gebeurtenissen. De gebruiker kan verschillende alternatieven modelleren die gaan van het toevoegen van rijvakken tot het manipuleren van de verkeerscontrole systemen door bijvoorbeeld de tijden van verkeerslichten aan te passen. CORSIM kan na simulatie een weelde aan informatie opleveren die de performantie van het wegennetwerk weergeeft [UF99].

Yang en Koutsopoulos ([Ahm99], paragraaf 2.2) ontwikkelden in 1996 hun simulator, MITSIM (zie 3.2.4 en 4.3.3). Ook zij klasseerden de vakveranderingen onder MLC en DLC.

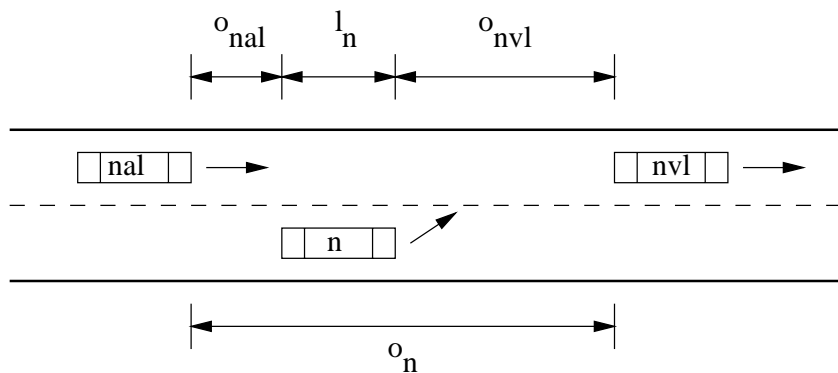
In hun model beschouwt een bestuurder een vrijwillige vakverandering (DLC) enkel als de snelheid van zijn voorligger lager is dan zijn eigen gewenste snelheid. Twee extra parameters werden voorzien : een ongeduldigheidsfactor en een factor die de bestuurders hun onverschilligheid ten opzichte van een snelheidsverandering weergeeft. Hierbij veronderstelden ze wel dat de kritische lengte van een opening, gedefinieerd als de minimale lengte voor een aanvaardbare opening, ver-

schillend is voor MLC en DLC. Zij hadden evenwel geen formele schatting van de in hun model gebruikte parameters gedaan.

Recentelijk, in 1996, ontwikkelde Ahmed [Ahm99] een algemene opzet die een vakverandering voor zowel MLC als DLC beschrijft. Hij gebruikte vier stappen in zijn model : het overwegen van een vakverandering, de keuze van het nieuwe vak, het aanvaarden van de opening in dat vak en het eigenlijk uitvoeren van de vakverandering. De parameters voor dit model werden enkel maar geschat voor een specifiek geval, namelijk verkeer dat langs een oprit invoegt op een autosnelweg.

3.3.3 Een wiskundige vertaling

In paragraaf 3.3.1 werd al gesproken over het opening-aanvaardingsgedrag. Figuur 3.2 toont welke geometrische parameters een rol spelen bij het uitdrukken van de grootte van een opening.



Figuur 3.2: Diverse parameters bij een vakverandering.

In deze figuur is te zien dat bestuurder n van vak wil veranderen, hij onderzoekt daarvoor de grootte van de opening o_{nal} (gevormd door de nieuwe achterligger nal) en de grootte van de opening o_{nvl} (gevormd door de nieuwe voorligger nvl). De totale grootte van de opening is $o_n = o_{nal} + o_{nvl} + l_n$ met l_n de lengte van het voertuig van de bestuurder in kwestie.

Indien een bestuurder nu van vak wil veranderen (MLC of DLC) dan dient hij in het model zeker over volgende drie zaken, die bepalen of een vakverandering mogelijk en/of veilig is, te beschikken :

- de grootte van de totale opening,
- de minimale grootte van de totale opening die de bestuurder veilig acht om van vak te kunnen veranderen

- en de snelheid waarmee hij zich voortbeweegt alsmede de relatieve snelheid van de andere voertuigen in het naburige vak.

Op basis van deze informatie worden dan volgende beslissingen genomen :

- als de beschikbare opening $<$ kritische grootte van de opening \Rightarrow verwerp deze opening,
- als de beschikbare opening \geq kritische grootte van de opening \Rightarrow aanvaard deze opening.

In een verkeersstroom is een grote diversiteit aan bestuurders en de modellen dienen dan ook deze diversiteit te reflecteren. In de jaren 60 en jaren 70 baseerde men de modellen op de verdeling van de kritische groottes van de openingen. Herman en Weiss ([Ahm99], paragraaf 2.2.1) veronderstelden een exponentiële verdeling, Drew ([Ahm99], paragraaf 2.2.1) een lognormale verdeling en Miller ([Ahm99], paragraaf 2.2.1) een normale verdeling. Geen van allen beschouwde echter het effect van vorige gebeurtenissen, namelijk een bestuurder die bijvoorbeeld al door een aantal auto's in het naburige vak voorbij is gereden en nog steeds geen geschikte opening heeft gevonden.

Daganzo ([Ahm99], paragraaf 2.2.1) stelde in 1981 dat de kritische grootte van een opening wordt gegeven door :

$$G_n^{kgo}(t) = G_n + \epsilon_n^{kgo}(t), \quad (3.18)$$

waarbij G_n de groottes van de openingen geschikt voor bestuurder n voorstelt en $\epsilon_n^{kgo}(t)$ een willekeurige term die varieert voor verschillende openingen en verschillende bestuurders. Beiden zijn onafhankelijk en normaal verdeeld. De G_n worden bekomen door voor een aantal bestuurders observaties te doen in verband met het aanvaarden of verwerpen van openingen in het naburige vak. Daganzo had echter problemen met het schatten wat soms leidde tot negatieve groottes voor kritische grootte van de openingen.

Mahmassani en Sheffi ([Ahm99], paragraaf 2.2.1) bouwden verder op het werk van Daganzo. Ze stelden dat het gemiddelde van de grootte van de openingen een functie van verklarende variabelen was zodat ook andere factoren (zoals het snelheidsverschil, de afstand tot een te nemen afrit, ...) op een gemakkelijke manier konden gemodelleerd worden. Zij ondervonden dat de ongeduldigheidfactor, in hun model afhankelijk van het aantal openingen dat een bestuurder reeds liet passeren, een grote invloed op het gedrag van bestuurders en dus ook op de resultaten had.

De laatste jaren worden steeds ingewikkeldere modellen gebruikt die zoveel factoren in rekening brengen dat langs de ene kant deze modellen wel een grotere voorspellingskracht hebben, maar dat langs de andere kant de nodige berekeningen drastisch toenemen. Dit laatste vormt dankzij de vooruitgang in de computerindustrie niet echt een probleem meer. Al is de ontwikkeling van real-time systemen – gebaseerd op deze ingewikkelde modellen – voor het moment nog een droom (voor het moment dient men naar een zekere eenvoud te streven die de werkelijkheid zo goed mogelijk benaderd).

3.3.4 Conclusies

Bij het modelleren van vakveranderingen gaat de grootste aandacht uit naar het modelleren van het gedrag voor het aanvaarden van openingen. Het tegenwoordige onderzoek spitst zich dan ook vooral toe op deze enkele component.

Een groot tekort van de ontwikkelde modellen is dat ze nog niet echt goed het verkeer in opstoppingssituaties kunnen beschrijven. Men heeft de indruk dat in file het gedrag van bestuurders anders is dan het gedrag dat deze bestuurders vertonen in vrij verkeer. Het grote probleem is dat men tot op heden nog geen echte concrete formulering van file heeft kunnen bedenken die op alle plaatsen en in alle omstandigheden toepasbaar is. Onderzoek hiernaar wordt dan ook door mij sterk aangemoedigd.

3.4 Conclusies

In dit hoofdstuk werden verkeersstromen fundamenteel anders beschouwd, namelijk vanuit het standpunt van de kleine elementen (de voertuigen) waaruit deze zijn opgebouwd. Om de dynamische wisselwerkingen tussen deze elementen te beschrijven werden de voertuig-volg modellen en vak-verander modellen ontwikkeld.

Vanuit dit standpunt werd eerst gekeken naar de verschillende menselijke factoren die een rol spelen tijdens het besturen van een voertuig. Uiteindelijk bleek dat niet al deze factoren nodig zijn om een realistische beschrijving van een verkeersstroom te geven. Men streeft naar een zo goed mogelijke benadering van de werkelijkheid terwijl men toch met een zo groot mogelijke eenvoud van modellen wil werken. Empirische experimenten en een goed pak intuïtie gaven aanleiding tot de eerste ontwikkeling van de voertuig-volg modellen.

De belangrijkste component in het volgen van een voertuig is de tussenruimte (of anders beschouwd, de tussentijd) die wordt gevormd met de voorligger. Op basis

van de grootte hiervan zal een bestuurder de snelheid van zijn voertuig controleren door middel van het rechtstreeks ingrijpen op de versnelling ervan (namelijk het bedienen van de pedalen).

De vak-verander modellen omvatten de volgende stap, namelijk de wisselwerkingen tussen bestuurders in naburige vakken. Deze modellen zijn aanzienlijk complexer daar er rekening dient te worden gehouden met statistische verdelingen die het gedrag van bestuurders proberen te vatten. Daarbij komt nog dat men niet alle variabelen kent die een rol spelen bij het beslissen of men al dan niet van vak verandert. Van de variabelen die men wel kent, weet men dan weer niet perfect wat hun juiste impact of het model zou moeten zijn en in welke mate ze bijdragen tot het geheel. Dit kan men goed zien bij het schatten van de modelparameters : dit gebeurt meestal niet op een statistisch rigoureuze manier.

Een belangrijk punt is dat men het gedrag van bestuurders nog niet volledig doorgrond heeft. Het gedrag in een verkeersstroom is afhankelijk van de macroscopische toestand waarin deze verkeersstroom zich bevindt : vrij verkeer, gesynchroniseerd verkeer of opgestopt verkeer.

Al deze zaken in het achterhoofd houdend, dient men vanaf nu met kritische blik te kijken naar de ontwikkelde modellen en zeker naar de toepassing ervan. Het aantal bestaande modellen voor simulatie van verkeersstromen is zo groot dat men zich terecht vragen kan stellen bij de correctheid ervan. Dit wil niet zeggen dat deze modellen waardeloos zijn ! Vandaag de dag worden ze al concreet – *en met succes* – toegepast, getuige daarvan bijvoorbeeld de toepassing van MITSIM op het *Boston's Central Artery/Tunnel Project (CAT)*.

Hoofdstuk 4

Simulators

Inleiding

si·mu·la'tor *m* (-la'tors,-lato'ren) 1 iem. die simuleert; 2 toestel dat verrichtingen nabootst, *inz. mil.* voor oefening [Hae80].

Simuleren is een steeds meer populair en effectief middel om een grote variëteit aan dynamische problemen te analyseren. Deze problemen worden meestal geassocieerd met complexe processen die niet gemakkelijk beschreven kunnen worden in analytische termen. Deze processen worden meestal gekarakteriseerd door de interacties tussen zeer veel systeemcomponenten (bijvoorbeeld de individuele voertuigen in een verkeersstroom). Meestal is het gedrag van zo'n component en de wisselwerkingen ervan met andere componenten wel goed begrepen en kan dit logisch en wiskundig worden uitgedrukt. De complexe gelijktijdige interacties tussen veel systeemcomponenten kan men echter niet zo bevredigend in logische of wiskundige vorm weergeven.

Vandaar dat men simulatiemodellen gaat gebruiken die ontwikkeld zijn om het gedrag van zulke systemen na te bootsen (zie bovenstaande woordverklaring). Behoorlijk ontwikkelde modellen integreren het gedrag van de gescheiden componenten evenals hun interacties en produceren een gedetailleerde kwantitatieve beschrijving van de performantie van het systeem. Simulatiemodellen zijn logische of wiskundige voorstellingen (ook wel abstracties genoemd) van werkelijke systemen. Ze nemen de vorm aan van computerprogramma's die op computers worden uitgevoerd.

De gebruiker van dergelijke programma's geeft een scenario op en de simulatie levert hem/haar dan statistische en grafische resultaten. De eerste soort resultaten, namelijk numerieke gegevens, kan de analist een gedetailleerde kwanti-

tatieve beschrijving geven van *wat* er hoogstwaarschijnlijk zal gebeuren. De tweede soort resultaten kan inzicht geven *waarom* het systeem zich op een bepaalde manier gedraagt. Het blijft natuurlijk wel de verantwoordelijkheid van de analist om deze resultaten correct te interpreteren [LR96].

4.1 Wanneer dient men simulatiemodellen te gebruiken ?

Vermits simulatiemodellen een dynamisch proces *beschrijven* kan men ze gebruiken in volgende situaties :

- een wiskundige behandeling van het probleem is onmogelijk wegens de schaal waarop dit probleem zich situeert of wegens de complexiteit van het proces,
- de onderliggende veronderstellingen van een wiskundige formulering wekken twijfels op in verband met de accuraatheid of toepasbaarheid van de resultaten,
- de wiskundige formulering stelt een dynamische omgeving als een standvastig-toestandssysteem (*steady-state system*) veel te eenvoudig voor waardoor er bepaalde aspecten in van dynamische processen verloren kunnen gaan,
- er is behoefte om de animatie van de voertuigen te zien om een inzicht te krijgen over *hoe* het systeem zich gedraagt zodat men kan verklaren *waarom* bepaalde resultaten worden bekomen
- en als er zich gedurende lange tijd opstoppingen voordoen (deze zijn immers inherent verbonden met de dynamische aard van de verkeersstromen en dit is moeilijk wiskundig exact te vatten).

Het is belangrijk in te zien dat simulaties slechts een hulpmiddel zijn. Ze worden gebruikt om veel grotere zaken, zoals optimalisatie, schattingen van capaciteit, verkeersbeheer, ... te onderzoeken en te verifiëren. De simulaties kunnen dan een specifieke vorm van resultaten opleveren, namelijk effectiviteitsmetingen (ook wel MOE's genoemd wat staat voor *Measures of Effectiveness*). Deze metingen kunnen dan bijvoorbeeld doorstromingsgraden, gemiddelde snelheden, reistijden, voertuigemissies, ... zijn [LR96].

4.2 Classificatie van simulators

Praktisch alle simulators beschrijven dynamische systemen : *tijd* is altijd de onafhankelijke variabele. *Continue simulators* beschrijven hoe de elementen van een systeem in de loop van de tijd continu van toestand veranderen als reactie op continue stimuli. *Discrete simulators* stellen realistische systemen voor (die continu of discreet kunnen zijn) door vast te stellen dat de toestanden van deze systemen abrupt veranderen op discrete punten in de tijd. Twee veel voorkomende types van discrete simulators zijn de klok-gedreven en de gebeurtenis-gedreven simulators.

Simulators kunnen echter ook nog op een andere manier geclassificeerd worden, namelijk al naargelang de mate van detail waarop ze het te bestuderen systeem voorstellen. Men spreekt dan van macroscopische, mesoscopische en microscopische simulators.

In dit deel wordt nu dieper ingegaan op de verschillende soorten classificaties. Het is gebaseerd op [Kou99b] en [LR96].

4.2.1 Klok-gedreven simulators

In dit type discrete simulators wordt de tijd gesegmenteerd in opeenvolgende intervallen van gekende lengte/duur. In elk van die intervallen berekent de simulator de activiteiten die bepaalde systeemelementen van toestand doen veranderen. Deze manier van werken is analoog aan de voorstelling van een differentiaalvergelijking die uitgedrukt wordt in de vorm van een eindige differentie-uitdrukking met onafhankelijke variabele Δt .

De keuze van Δt is belangrijk op het gebied van efficiëntie en accuraatheid van de simulator. Een te kleine waarde levert een te trage simulator op (die weliswaar zeer nauwkeurig kan zijn) terwijl een te grote waarde een onnauwkeurige simulator oplevert (die wel sneller zal zijn). De meest voorkomende waarden voor Δt variëren van 0,1 s tot 1 s. Het is belangrijk te vermelden dat een te kleine waarde ook niet altijd nuttig is ; er dient rekening te worden gehouden met de reactietijd van de bestuurders. Het is inderdaad nogal zinloos om $\Delta t = 0,001$ s te nemen terwijl geweten is dat de acties die bestuurders ondernemen nooit zo precies tot op één duizendste van een seconde zijn.

Merk op dat de lengte van de tijdsintervallen verschillend kan zijn voor verschillende processen. Men spreekt dan van *asynchroon* gedrag in plaats van *synchroon* gedrag.

4.2.2 Gebeurtenis-gedreven simulators

Sommige systemen worden gekarakteriseerd door entiteiten die niet zo frequent veranderen. Een voorbeeld hiervan zijn verkeerslichten die in een typische situatie slechts drie toestanden kennen (namelijk rood, oranje en groen) en die gedurende lange tijd in zo'n toestand verblijven waarna ze plots van toestand veranderen (bijvoorbeeld de overgang van rood naar groen). Deze plotse toestandsverandering noemt men een gebeurtenis. Vermits de toestand van bijvoorbeeld een verkeerslicht altijd perfect kan beschreven worden door de toestand te beschrijven als een opeenvolging van gekende gebeurtenissen (de kleuren) kan men drastisch inperken op de nodige computertijd door enkel deze gebeurtenissen te beschouwen in plaats van elke Δt .

Systemen die niet zo frequent variëren met de tijd kunnen beter en efficiënter beschreven worden met behulp van gebeurtenissen in plaats van klok-gedreven te werken. De moeilijkheid die wel overwonnen dient te worden, is het bepalen van de volgorde waarin de gebeurtenissen optreden.

4.2.3 Macroscopische simulators

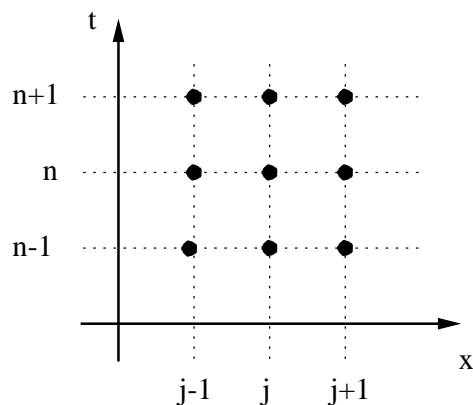
Een macroscopische simulator zal de componenten in het systeem (alsmede hun onderlinge wisselwerkingen) op een laag niveau van detail beschrijven. Typisch daarvoor is dat men de verkeersstroom als een vloeistof gaat benaderen en spreekt in termen van doorstromingsgraden, snelheden en dichtheden. Een neveneffect is bijvoorbeeld dat men nu niet meer kan spreken over bestuurders die van vak veranderen aangezien dit hier niet meer aan de orde is.

Meestal zijn deze simulators deterministisch van aard, er worden geen willekeurige waarden gebruikt afkomstig van een RNG (*random number generator*). De toepasbaarheid ervan is in veel gevallen ook beperkt tot het simuleren van autosnelwegen. Aan de basis ervan liggen meestal continue stroommodellen (zie paragraaf 2.3), macroscopische stroommodellen (zie paragraaf 2.4) en stroommodellen gebaseerd op wachtrij-theorie (zie paragraaf 2.5).

De basisaanpak die men volgt is (1) een discretisering van tijd en ruimte waarna men (2) kinetische vergelijkingen numeriek oplost.

Voor (1) definieert men een rooster van punten in het tijd-ruimte domein (zie figuur 4.1) en werkt men met eindige differentie-vergelijkingen. Een voorbeeld van deze vergelijkingen zijn de voorwaartse differenties :

$$\frac{k_j^{n+1} - k_j^n}{\Delta t}, \frac{q_{j+1}^n - q_j^n}{\Delta x}. \quad (4.1)$$



Figuur 4.1: Discretisering van tijd en ruimte.

Men kan dan behoud van doorstroming toepassen met de continuïteitsvergelijking 2.11.

Deze simulators hebben wel het grote voordeel dat ze snel resultaten kunnen leveren en meestal ook weinig eisen stellen aan de beschikbaarheid van hulpmiddelen (zoals computergeheugen, opslagcapaciteit, ...).

Een nadeel is dat men beperkt is met het model voorhanden. Indien men bijvoorbeeld incidenten (ongevallen en dergelijke) wil modelleren dan komt er een extra moeilijkheid bij kijken : incidenten uiten zich door een vermindering van het aantal beschikbare rijvakken en het is dan ook de taak om naar geschikte waarden voor de verschillende parameters te zoeken.

Voorbeelden van macroscopische simulators zijn FREFLO, FREQ, KRONOS, METACOR, NETCELL, NETVAC en nTRAQ (zie paragraaf 4.3.1 voor meer).

4.2.4 Mesoscopische simulators

Mesoscopische simulators stellen de meeste componenten in een systeem wel met een hoog niveau van detail voor maar beschrijven hun onderlinge wisselwerkingen met een veel lager niveau van detail. Een typische werkwijze is dat men groepen van voertuigen gaat beschouwen (dit noemt men dan cellen) en dat men vakveranderingen als ogenblikkelijke gebeurtenissen zal modelleren die gebaseerd zijn op relatieve dichtheden in rijvakken in plaats van expliciet de wisselwerkingen tussen voertuigen onderling te beschrijven.

Meestal zal hier enkel de tijd gediscetiseerd worden en blijft de ruimte continu. De cellen bestaan uit voertuigen met gelijkaardige karakteristieken. Een groot deel

van de interne werking is analoog aan macroscopische simulators maar er wordt met meer details rekening gehouden, voornamelijk details die betrekking hebben op de elementen waaruit de verkeersstromen zijn opgebouwd.

Voorbeelden van mesoscopische simulators zijn DYNASMART, DynaMIT (zie paragraaf 4.3.2), INTEGRATION, METROPOLIS en CONTRAM.

4.2.5 Microscopische simulators

Van alle soorten simulators zijn microscopische simulators de meest grondige. Zij beschrijven zowel het systeem als de componenten van het systeem op een hoog niveau van detail. Hier wordt een verkeersstroom niet langer meer als vloeistof beschouwd maar worden de individuele voertuigen expliciet gemodelleerd. Dit brengt met zich mee dat ook de interacties tussen deze voertuigen moeten beschreven worden en dat gebeurt dan met de eerder besproken voertuig-volgmodellen (zie paragraaf 3.2) en vak-verandermodellen (zie paragraaf 3.3).

Een bijkomend feit is dat de voertuigen gerouteerd moeten worden : voor elk voertuig moet een pad gekend zijn (of berekend worden) zodat de simulator weet naar waar hij de voertuigen moet verplaatsen. Dit is belangrijk bij de zogeheten MLC's waarbij een bestuurder beslist dat hij van vak moet veranderen om een oprit of afrit te nemen.

Tijdens het simuleren wordt uitgebreid gebruik gemaakt van RNG's zodat deze simulators stochastisch van aard zijn. Een aangenaam voordeel is de mogelijkheid om op deze manier experimenten te herhalen.

Handig is dat indien men scenario's wil testen dit rechtstreeks kan gebeuren door de beschrijving van het onderliggende wegennetwerk van de simulator te veranderen. Zo kan men verschillende alternatieven testen alvorens een keuze te maken. Men kan zich dan baseren op minimale reistijden, duur van opstoppingen, . . .

Voorbeelden van microscopische simulators zijn AIMSUN, FOSIM, FRESIM, HUTSIM, MICROSIM, MITSIM (zie paragraaf 4.3.3), NETSIM, PARAMICS en THOREAU.

4.2.6 Conclusies

Simulators bestaan in allerlei soorten. Meestal worden ze gekarakteriseerd als zijnde macroscopisch, mesoscopisch of microscopisch van aard.

De computerprogramma's van microscopische simulators zijn duur om te ontwikkelen, uit te voeren en te onderhouden. Terwijl deze simulators het potentieel

hebben om accurater te zijn dan hun minder gedetailleerde tegenhangers, kan dit potentieel niet altijd gerealiseerd worden wegens de complexiteit van hun logica en het groter aantal parameters dat gekalibreerd dient te worden.

De simulators van lagere betrouwbaarheid zijn daarentegen gemakkelijker en goedkoper om te ontwikkelen, uit te voeren en te onderhouden. Ze dragen wel het risico in zich mee dat hun voorstelling van de werkelijkheid minder accuraat kan zijn, minder geldig en misschien ontoepasselijk. Deze simulators dienen gebruikt te worden wanneer (1) de resultaten niet gevoelig zijn voor microscopische details, (2) de schaal van toepasbaarheid voldoende is zodat geen microscopische simulator nodig is en (3) de beschikbare tijd en hulpmiddelen voor de ontwikkeling van het model beperkt zijn.

De ontwikkeling van een simulator is een proces dat bestaat uit diverse stappen (waarvan er enkele meerdere malen doorlopen dienen te worden). Vertrekkend van een omschrijving van het probleem en de te verwezenlijken doelstellingen, dient een systeem gebouwd en bestudeerd te worden waarna de eigenlijke ontwikkeling van het model kan beginnen. Daarna dient het model gevalideerd te worden (en hier dient men eventueel een stap terug te zetten om bepaalde zaken aan te passen), waarna het effectief kan gebruikt worden.

4.3 Enkele simulators

In dit deel worden enkele simulators besproken. Als voorbeeld van een macroscopische simulator wordt TRAQ toegelicht, als voorbeeld van een mesoscopische simulator wordt DynaMIT toegelicht en als voorbeeld van een microscopische simulator wordt MITSIM toegelicht.

4.3.1 TRAQ

TRAQ staat voor *Traffic Flow Analysis and Queueing Theory*. Het is een programma dat ontwikkeld werd aan het UFSIA (Universitaire Faculteiten Sint-Ignaatius te Antwerpen) en macroscopisch van aard is.

De bespreking is gebaseerd op [WV00] en een persoonlijk gesprek met de auteur van het systeem, Tom Van Woensel.

Introductie

Het programma TRAQ benadert de analyse van verkeersstromen vanuit een ander standpunt. Daar waar de traditionele systemen werken in termen van doorstro-

mingsgraad, snelheid en dichtheid zal TRAQ vertrekken vanuit een analytisch standpunt, namelijk door gebruik te maken van wachtrij-theorie.

Het model waarop TRAQ gebaseerd is, steunt op het G/G/1 wachtrij model (zie paragraaf 2.5.4) en het toestandsafhankelijk G/G/1 wachtrij model (zie paragraaf 2.5.5). Buiten het bepalen van de traditionele snelheid-doorstromingsgraad, snelheid-dichtheid en doorstromingsgraad-dichtheid grafieken leent het model zich er ook toe om gevoeligheidsanalyses te verrichten die weergeven wat de invloed van kleine veranderingen in bepaalde parameters is en de impact van verkeer op het milieu (door studie van de voertuigemissies).

Het programma

TRAQ werd geschreven in Microsoft Visual Basic 6, berekent zijn data in minder dan één minuut en werkt met volgende parameters :

- de nominale snelheid SN ,
- de maximale dichtheid C ,
- de coëfficiënt van variatie in de aankomsttijden c_a ,
- de coëfficiënt van variatie in de bedieningstijden c_s ,
- het te gebruiken type wachtrij-model (G/G/1, lineair toestandsafhankelijk G/G/1 of exponentieel toestandsafhankelijk G/G/1 met drukcoëfficiënt a),
- de eventueel te verrichten gevoeligheidsanalyse op c_a , c_s , beiden, SN of C ,
- de naam en lokatie van het uitvoerbestand (de data wordt gegenereerd in het Microsoft Excel formaat)
- en de naam en lokatie van het invoerbestand dat de voertuigtellingen bevat (de data dient opgeslagen te zijn in het Microsoft Excel formaat) alsmede enkele parameters zoals het aantal dagen in het bestand, de eerste dag in het bestand en de maximaal waargenomen doorstromingsgraad).

Praktische toepassing

TRAQ werd toegepast op een punt op de autosnelweg E40. Het berekende maximale doorstromingsgraden en dichtheden in de omgeving van dit punt. Er werden ook gevoeligheidsanalyses verricht op c_a , c_s en beiden. Tot slot werden NO_x -

CO -, CO_2 - en VOC -voertuigemissies berekend voor voertuigen rijdend op benzine en op diesel. De gebruikte modellen voor deze emissies zijn die van het MEET (Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport), een procedure ontwikkeld door het European Environment Agency (EEA) dat als doel heeft een uniforme, Europese procedure te verschaffen die in staat is de impact van transport op luchtvervuiling te evalueren.

Momenteel wordt er gewerkt aan nTRAQ dat verschillende stations met elkaar verbindt waardoor een netwerk kan gevormd worden. Een concrete toepassing hiervan zal gebeuren op het verkeer op de Ring rond Antwerpen (R1).

4.3.2 DynaMIT

DynaMIT (*Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travelers*) is een aan het Massachusetts Institute of Technology (MIT) ontwikkelde mesoscopische simulator. Het hoofddoel ervan is om voorspellingen over verkeerssituaties te doen en de reiziger geschikte reisinformatie aan te bieden. DynaMIT is een real-time simulator die reële verkeersobservaties gebruikt en dan tijdsafhankelijke OD-verkeersstromen (dit zijn de verkeersstromen van oorsprong (*origin*) naar bestemming (*destination*)) schat en voorspelt.

De bespreking is gebaseerd op [Kou99a] en op [MIT98].

Introductie

DynaMIT incorporeert verschillende klassen van bestuurders en hun gedrag. Het bevat de mogelijkheid zichzelf te kalibreren, kan de huidige netwerkcondities schatten, toekomstige verkeerscondities voorspellen, zichzelf verbinden met een verkeerscontrole-systeem en kan reisinformatie voor de bestuurders genereren. Er worden twee belangrijke taken uitgevoerd :

- toestandsschatting : de toestand van het netwerk kan geschat worden aan de hand van doorstromingsgraden, wachtrijen en dichtheden. Dit gebeurt door expliciete simulatie van de aanvoer (het netwerk) en de aanvraag (het gedrag van de reizigers).
- Generatie van reisinformatie : deze dient consistent en zo optimaal mogelijk voor de reizigers te zijn. Consistentie wil zeggen dat de netwerkcondities die verwacht worden overeenkomen met de condities die ontstaan doordat de reizigers de aangeboden reisinformatie verwerken. Het zo optimaal mogelijk zijn duidt op het feit dat er geen andere informatie beschikbaar is die

de reizigers zouden kunnen gebruiken om zo een snellere reistijd te verwezenlijken.

Het programma

DynaMIT houdt zich in hoofdzaak bezig met dynamische verkeerstoewijzing (DTA wat staat voor *dynamic traffic assignment*). Het dient daarom ook toepasbaar te zijn voor redelijk grote netwerken (dit is realistisch) en een groot aantal voertuigen die in dit netwerk rondbewegen. Eigenlijk is DynaMIT een leverende simulator : hij kan informatie verschaffen aan een verkeerscontrole-systeem.

Het netwerk waar gebruik van wordt gemaakt bestaat uit unidirectionele links die telkens twee knooppunten met elkaar verbinden. Deze knooppunten kunnen kruispunten, ronde punten of punten waarlangs routes lopen zijn. Het mesoscopische stuk van deze simulator zit in het feit dat links bestaan uit segmenten. Elk segment heeft een bewegend stuk (waarin voertuigen zich met een zekere snelheid voortbewegen) en een vak-specifiek wachtrij stuk waarin voertuigen zich in een opstopping bevinden. Deze segmenten kunnen dynamisch aangemaakt worden zodat men incidenten (ongevallen, ...) kan voorstellen. Per segment wordt de toelaatbare capaciteit gespecificeerd en vakken worden gegroepeerd volgens gelijke karakteristieken en afspraken in de HCM. Deze groepen van vakken hebben een bepaalde uitvoercapaciteit.

De voertuigen worden gegroepeerd in ondeelbare pakketten en elk pakket past volledig in een link en stelt een groep voertuigen voor met dezelfde homogene karakteristieken (zoals het type van voertuig, de vertrektijd, ...). De grootte van een pakket is variabel maar er is wel een maximale waarde. De positie ervan in het netwerk wordt bepaald door één enkel punt.

Pakketten worden doorheen het netwerk voortbewogen volgens welgedefinieerde regels. Deze regels beschrijven het gedrag van een pakket indien er wel en geen opstopping is (wat oplevert dat er ook wachtrij-theorie in dit model wordt toegepast). Indien er geen opstopping is dan wordt de snelheid gegeven door volgende functie van de positie :

$$v(x) = \frac{v_B - v_A}{L_a} (x - (L - L_a)) + v_A, \quad (4.2)$$

met A en B twee opeenvolgende segmenten, L_a de lengte van de versnellingszone in segment A , L de positie van segment B en x de positie van het pakket. v_A is de geschatte snelheid gebaseerd op snelheid-dichtheid relaties, bijvoorbeeld :

$$v(A) = \max \left\{ v_{min}, v_0 \left(1 - \left(\frac{k_A}{k_j} \right)^\beta \right)^\alpha \right\}, \quad (4.3)$$

met v_{min} de minimum snelheid, v_0 de snelheid voor vrij verkeer, k_A de dichtheid van segment A en k_j , α en β parameters.

Indien er wel opstopping is dan hangt het ervan af in welk stuk van de opstopping de pakketten zitten : het bewegend stuk of het opgestopt stuk. In het eerste stuk worden de pakketten voortbewogen met de snelheid waarmee de wachtrij zich verplaatst, in het tweede stuk worden pakketten voor een zekere tijd in de wachtrij gehouden (deze wachtrijen zijn specifiek voor elk vak).

De simulator bevat een simulatiecyclus met vaste periode Δt die telkens doorlopen wordt. Het netwerk wordt topologisch gesorteerd om correcte resultaten te verkrijgen waarna alle segmenten onder de loep worden genomen. Nadat alle acties bepaald zijn worden alle pakketten in het netwerk behandeld.

Praktische toepassing

De simulator werd met succes toegepast op het *Central Artery Network* in de buurt van Boston. Het experiment omvatte 182 knooppunten, 211 links, 639 segmenten, 1259 vakken, 639 groepen van vakken en 1566 mogelijk te volgen paden. Simulatie van een uur nam in werkelijkheid slechts een paar minuten in beslag. Deze tijd varieerde sterk al naargelang men snelheid boven accuraatheid verkoos.

Momenteel is men bezig om het gebruikte model aan te passen zodat het meer flexibel werkt. Het hoofdpunt zal het groeperen van pakketten in cellen zijn. De positie van zo'n cel in het netwerk wordt dan gekarakteriseerd door de posities van de eerste en het laatste pakket van die cel in het netwerk. De karakteristieken van de pakketten in eenzelfde cel zijn wel uniform verdeeld maar de lengte van de cel zelf kan variëren al naargelang de relatieve snelheid van het eerste en laatste pakket in de cel. Verder kunnen cellen zich ook splitsen evenals zich met elkaar samenvoegen.

4.3.3 MITSIM

MITSIM (*Microscopic Traffic Simulator*) maakt deel uit van een groter geheel dat SIMLAB (*Simulation Laboratory*) wordt genoemd. De ontwikkeling geschiedde aan het Massachusetts Institute of Technology. SIMLAB dient om geavanceerde verkeersbeheer-systemen (ATMS of *Advanced Traffic Management Systems*) en

geavanceerde reizigersinformatie systemen (ATIS of *Advanced Traveler Information Systems*) te testen en te evalueren. Het systeem integreert de microscopische simulator MITSIM en de verkeersbeheer-simulator TMS (Traffic Management Simulator). MITSIM simuleert in detail de beweging van de voertuigen in het wegennetwerk die aan TMS worden doorgegeven zodat deze laatste reisinformatie ter beschikking van de bestuurders kan stellen (door deze informatie terug aan MITSIM te geven). TMS maakt daarenboven ook nog eens gebruik van een snellere mesoscopische simulator MesoTS (*Mesosopic Traffic Simulator*) die korte termijn voorspellingen over de verkeerscondities kan doen.

De bespreking is gebaseerd op [Kou99a] en [Yan97].

Introductie

Het hart van SIMLAB wordt eigenlijk gevormd door MITSIM. Deze laatste stelt de werkelijke verkeerssituatie voor en het is dan ook een vrij uitgebreide component. MITSIM is geschreven om zo'n breed mogelijk toepassingsdomein te hebben. De logica die het in zich herbergt gaat van het gebruik van verkeerslichten en informatieborden tot gesimuleerde lusedetectoren, verkeersregelingen aan opritten, ...

Daarenboven is er ook nog een uitgebreide reisplanning aanwezig zodat bestuurders een vast, opgegeven pad kunnen volgen maar ook de mogelijkheid om gebruik te maken van informatie in verband met korste paden, efficiëntste wegen (weinig of geen opstoppingen), ...

Het programma

SIMLAB (en dus ook MITSIM) is volledig object-georiënteerd in C++ geschreven. Er werd gebruikt van een Motif Wrapper (waarvan enkele klassen ontwikkeld werden gebruik makend van de Silicon Graphics IRIS ViewKit bibliotheek). De boodschappen tussen TMS, MITSIM en MesoTS worden beheerd door de PVM-bibliotheek (*Parallel Virtual Machines*, een systeem waarmee boodschappen tussen verschillende processen – eventueel draaiende op verschillende computers – kunnen uitgewisseld worden). Verder wordt er voor het inlezen van de invoerbestanden gebruik gemaakt van FLEX en BISON++, twee populaire hulpmiddelen bij het schrijven van andere compilers, ... De programma's draaien op Unix werkstations die X-Windows ondersteunen.

Het netwerk in MITSIM bestaat uit knooppunten die links, bestaande uit segmenten, met elkaar verbinden. Een segment bevat informatie over de lengte ervan, het aantal vakken, de helling en conditie van het wegdek, alsmede een eventuele

snelheidsbeperking en geometrische informatie. Segmenten zijn dus delen van de rijbaan met gelijke geometrische karakteristieken. Per vak kan dan nog eens opgegeven worden wat de overgangsregels zijn. Verder zijn er nog tolbruggen, stoplichten, informatieborden, ... in het systeem aanwezig.

Het systeem werkt met een verzameling aan reisinformatie die door de bestuurders gebruikt wordt. Het gedrag van elke bestuurder is instelbaar en dit uit zich in de verschillende parameters die gebruikt worden in het voertuig-volg model en het vak-verander model.

Zie paragraaf 3.2.4 voor een korte bespreking van de verschillende te onderscheiden situaties in het voertuig-volg model. In een recente versie van MITSIM zijn enkele interessante nieuwigheden opgenomen die het voertuig-volg model realistischer maken : de versnelling toegepast op tijdstip t is nu evenredig met de stimulus door de bestuurder waargenomen op tijdstip $(t - \tau)$, waarbij τ de reactietijd van de bestuurder is. De gevoeligheid wordt $\epsilon\tau$ s later dan de stimulus waargenomen ($\epsilon \in [0, 1]$ is een vertragingfactor) en is afhankelijk van de snelheid van het voertuig, de tussentijd met het voorliggend voertuig en de dichtheid van het verkeer voorop (dat in het gezichtsveld van de bestuurder valt). Merk op dat er ook overal willekeurige termen worden gebruikt die het effect van niet-geobserveerde factoren in rekening proberen te brengen.

Bij vakverandering onderscheidt men MLC en DLC waarbij er voor MLC ook een extra model gebruikt wordt dat het gedrag van bestuurders weergeeft indien zij van vak *moeten* veranderen maar dit niet kunnen. Dit is nuttig aangezien in sterke opgestopte verkeerscondities het vinden van een geschikte opening zeer moeilijk is waardoor bestuurders opzettelijk in de naburige verkeersstroom proberen te dringen.

Praktische toepassing

Het systeem werd succesvol toegepast op het *Central Artery Network* in de buurt van Boston. Het experiment draaide op een SGI Indigo2 R4400 machine en er werden 143 knooppunten en 171 links gebruikt. Men liet de simulators gedurende 1 uur draaien. Wat performantie betreft, stelde men vast dat indien men tijdens de simulatieduur geen gegevens opvroeg, deze 4 keer sneller draaide dan in werkelijke tijd. Indien men wel gegevens opvroeg daalde dit tot slechts 2 keer sneller en indien men te maken had met volledig gesatureerde condities in het netwerk dan haalde men nog maar een kwart van de snelheid.

Een andere succesvolle toepassing was het modelleren van de Gordel rond Amsterdam (A10). Er bleek dat indien men de bestuurders geschikte reisinformatie zou verschaffen, het netwerk voor ongeveer 18% optimaler zou werken.

4.4 Conclusies

Naar de (nabije) toekomst toe zou het gebruik van simulators sterk moeten toenemen. Een eerste stap hiertoe is het real-time simuleren van bijvoorbeeld autosnelwegen. Na validatie kan dan overgegaan worden tot het ontwikkelen van Intelligente Transport Systemen die kunnen ingeschakeld worden in het verkeersbeheer. Finaal is dan de volledige integratie zodat het verkeer optimaal en efficiënt kan verlopen. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld opstoppingen succesvol tot een minimum herleid worden.

De logica waarmee de simulators werken evolueert nog steeds. Vooral bij microscopische simulators is dit van belang, bijvoorbeeld de logica achter het vakverander model (in MITSIM werden achteraf grondige wijzigingen aangebracht die een meer realistische simulatie op het oog hadden [Ahm99]).

Deel II

Wetenschappelijke afbakening

Hoofdstuk 5

Probleemstelling

Inleiding

Beschouw de titel van deze thesis :

”Het gebruik van microscopische verkeerssimulatie bij een onderzoek naar de fileproblematiek op de Antwerpse Ring”

Alhoewel dit slechts een kort zinnetje is, mag men de inhoud ervan zeker niet onderschatten. In deze titel schuilen volgende drie belangrijke woorden : fileproblematiek, verkeerssimulatie en microscopisch. Achter elk van deze woorden schuilt een aparte wereld en het eerste deel van dit hoofdstuk tracht precies een inzicht te geven in elk van deze werelden. Vervolgens wordt een concrete formulering van het probleem zelf gegeven of anders gezegd : de directe doelstellingen van deze thesis worden verduidelijkt. Een verschil met het eerste deel van deze thesis is dat daar de terminologie werd geschetst waarmee men in het vakgebied van verkeerssimulaties werkt, terwijl er vanaf nu experimenten gedaan worden die steunen op de begrippen daarin en waarvan de resultaten een zekere maatschappelijke waarde (lees : *nut*) in zich dragen.

5.1 Inherente moeilijkheden

De titel van deze thesis weer beschouwend, springen drie belangrijke woorden naar voor. Voor elk van deze woorden wordt uitgebreid besproken wat de problematiek is die er inherent mee verbonden is en waarvoor – na het maken van beslissende keuzes – oplossingen gevonden dienen te worden. Deze oplossingen

worden hier nog niet vermeld, dat is de taak van het volgende hoofdstuk. Voor nu volstaat het in te zien dat het niet zo'n triviale problemen zijn die zich stellen.

5.1.1 Fileproblematiek

Wat is file ?

Tijdens mijn onderzoek kwam ik geregeld tot de vaststelling dat ik nog niemand ben tegengekomen die mij een bevredigende definitie van file kon geven. Met bevredigend bedoel ik uiteraard formeel en wiskundig beschrijfbaar. Als men er zelf even over nadenkt, merkt men al gauw dat het niet zo evident is om bijvoorbeeld een geschikte wiskundige formule op het concept file te plakken. Talrijke problemen manifesteren zich en maken het moeilijk om dit doel te verwezenlijken. Enkele voorbeelden daarvan zijn :

- In welke termen gaat men alles uitdrukken ? Of anders geformuleerd : welke zijn de grootheden waarmee zal worden gewerkt ?
- Is de formule overal toepasbaar of is het eerder iets dat slechts geldig is onder welbepaalde omstandigheden ?
- ...

Op de eerste vraag kan men natuurlijk snel (en waarschijnlijk ook onbezonnen) antwoorden : snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid. Maar zijn deze begrippen voldoende ? Is er niet meer nodig om het concept file te omvatten ? Het antwoord op deze laatste vraag is : ja, er is meer nodig. Immers, in de zojuist vermelde grootheden wordt totaal geen rekening gehouden met het bestuurdersgedrag, waarvan de wetenschap overtuigd is dat het een belangrijke rol speelt in opgestopte verkeerscondities.

De tweede vraag is zo mogelijk nog belangrijker ! Het volstaat immers niet om een plausibele definitie van file te geven indien men ze enkel kan toepassen in zeer specifieke situaties (bijvoorbeeld rechte stukken autosnelweg zonder tunnels, op- of afritten). De kracht van een goede definitie zit juist in de algemene toepasbaarheid ervan. Neem dat weg en er blijft niet veel bruikbaar meer over. In dit kader is het trouwens vermeldenswaard dat ik op het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap een persoon (Stijn Goossens) ben tegengekomen die me vertelde dat hij op zoek was naar één enkele parameter die hem toeliet het concept file gemakkelijk te definiëren. Zijn onderzoek staat nog maar in het prille begin, wat spijtig is aangezien ik ervan overtuigd ben dat dergelijk onderzoek een grote stap

voort kan betekenen voor het wetenschapsdomein dat zich met de verkeerssimulaties bezighoudt.

Er kan dus gesteld worden dat er wordt gewerkt met een toch wel vrij vaag begrip waarover iedereen wel *iets* kan zeggen maar waar nog niemand een concrete definitie voor heeft kunnen vinden.

5.1.2 Verkeerssimulatie

Bij het simuleren van verkeer staat de voorstelling van de verkeersstroom centraal. Dit enkele woord omhelst het hele gebeuren dat in de echte wereld plaatsvindt. Enerzijds kan men spreken over het macroscopisch gedrag van een verkeersstroom zodat een idee kan gevormd worden over de algemene werking en prestaties ervan, anderzijds kan men spreken over het gedrag van de verkeersstroom op microscopische schaal. Dit laatste beheerst de fundamentele werking van de verkeersstroom en het is mijn overtuiging dat een betere kijk op de interne werking van een verkeersstroom kan leiden tot een beter verstaan van het macroscopische gedrag ervan.

Men zou dus bijvoorbeeld het volgende kunnen stellen :

Eigenlijk is het eenvoudig : beschrijf het gedrag van de verkeersstroom op microscopisch niveau en het macroscopische gedrag zal zich automatisch manifesteren.

In theorie lijkt dit vanzelfsprekend maar in praktijk is het meestal niet zo evident. Vooral het zuiver correcte – *realistische* – gedrag zich manifesteert is het een absolute noodzaak om microscopisch alle parameters te bevatten die bijdragen tot dit gedrag. Echter, hier stuit men al direct op een probleem, namelijk dat men (1) nog niet alle parameters kent en (2) indien men ze kent, nog niet perfect weet in welke mate ze bijdragen. Indien beide problemen opgelost zijn, ligt de weg naar correcte modellering open. Men zal dan echter met nieuwe problemen dienen af te rekenen zoals de traagheid van het model die ontstaat door de sterk verhoogde complexiteit ervan, de noodzaak aan excessief veel hulpmiddelen (zoals computergeheugen, opslagcapaciteit, . . .) om de simulatie te kunnen uitvoeren en zeker niet te vergeten : mensen die dit alles nog begrijpen en efficiënt kunnen beheren.

Al bij al zullen er dus keuzes gemaakt moeten worden en in het bijzonder dient dan gesteld te worden welke parameters wel en welke parameters niet worden gemodelleerd.

5.1.3 Microscopisch

Met dit begrip zitten we in de verkeersstroom zelf. Zoals in paragraaf 5.1.2 reeds vermeld bepalen de microscopische elementen het macroscopische gedrag. Jammer genoeg is het geen eenvoudige taak om deze elementen te bepalen. Tot op heden is men er nog niet van overtuigd dat alle nodige elementen in kaart gebracht zijn. Sterker nog, hoe meer men er over nadenkt, hoe meer men geneigd is te stellen dat een verkeersstroom op microscopische schaal aanleunt bij een tegenwoordig populair concept :

chaos.

Van zodra men afwijkt van de voorspelbare, 'lineaire' en eenvoudig verklaarbare zijde van een probleem, betreedt men de 'duistere zijde' van de chaos. Inzicht krijgen in deze materie is zo mogelijk nog moeilijker dan in het eenvoudig verklaarbare, al lijkt dit op het eerste zicht niet zo. Het addertje onder het gras zit in het feit dat alhoewel een systeem met slechts enkele eenvoudige vergelijkingen beschrijfbaar is, het toch een gedrag kan vertonen waar geen duidelijke regelmaat in te onderscheiden is. Het is alsof het systeem een eigen leven begint te leiden en vanaf dat punt is het moeilijk om nog te verklaren waarom juist dit of dat gebeurt. Er kunnen verborgen veronderstellingen zijn waarvan men niet op de hoogte is. Om dit probleem aan te pakken, beroept men zich op chaos-theorie. De toepassing daarvan staat momenteel nog in haar kinderschoenen, er zullen nog talrijke jaren voorbijgaan vooraleer men ook daar serieus inzicht in krijgt. Momenteel geldt : roeien met de riemen die men heeft !

5.1.4 Conclusies

Alles kritisch beschouwd is het duidelijk dat het bestuderen van dynamische problemen zoals fileproblematiek en verkeerssimulaties geen eenvoudige taak is. Het is wel gebleken dat als verklaring van het gedrag van verkeersstromen in theorie alles herleid kan worden tot de meest fundamentele elementen die er deel van uitmaken. Op dat punt belandt men bij het microscopische aspect van verkeersstromen en hier worden al voldoende vraagstukken gepostuleerd. Naar volgend hoofdstuk toe kan gezegd worden dat een goede dosis menselijke intuïtie het meest noodzakelijke in deze situatie is !

5.2 Probleemomschrijving

Deze thesis heeft een tweevoudig doel : enerzijds een overzicht te geven van wat de in het vakgebied gehanteerde begrippen zijn en anderzijds het effectief toepassen van deze kennis op een concrete situatie. Het eerste deel van deze thesis behandelde de begrippen en het hiernavolgende derde deel zal de toepassing daarvan beschouwen. In wat nu volgt wordt er wat dieper ingegaan op hetgeen zich stelt bij deze toepassing.

5.2.1 Beschrijving van de te volgen stappen in het probleem

De zojuist vermelde toepassing heeft eigenlijk een concrete vorm. Ze steunt op de empirische methodes die in de wetenschap worden gebruikt : diverse hypothesen wordt voorgelegd, door middel van experimenten getest waarna de resultaten besproken worden. Om deze experimenten te realiseren zijn volgende stappen nodig [LR96] :

1. identificatie van het probleem :
 - welke types rijbaan worden gebruikt (autosnelwegen, stadswegen, ...) ?
 - Wat zijn de verkeerscondities (vrij verkeer of opgestopt verkeer) ?
 - Welk type verkeer wordt gebruikt (auto's, vrachtwagens, autobussen, ...) ?
 - Wat is de grootte van het wegennetwerk ?
2. Identificatie van het doel van de studie :
 - welke informatie wil men bekomen (statistische, grafische, ...) ?
 - Welke informatie is reeds beschikbaar (voertuigtellingen, snelheden, ...) ?
 - Hoe zullen de resultaten geïnterpreteerd worden (absoluut of relatief) ?
 - Is de toepassing real-time of niet ?
3. Onderzoek naar verschillende kandidaten voor simulatiemodellen :
 - wat zijn de sterke en zwakke punten ervan ?
 - Wat zijn de onderliggende veronderstellingen ?
 - Welke rekenkracht wordt vereist ?

- Welke bekwaamheid wordt vereist ?
4. Motivatie om een simulatiemodel te gebruiken :
 - zijn er andere (goedkopere) middelen beschikbaar die gebruikt kunnen worden ?
 - Is het nodig om simulaties te verrichten ?
 5. Keuze van het simulatiemodel :
 - wat zijn de relevante parameters ?
 - Hoeveel tijd kruipt in de ontwikkeling ?
 6. Bekomen van de nodige gegevens :
 - de geometrie van het wegennetwerk,
 - doorstromingsgraden
 - en reisinformatie voor de voertuigen.
 7. Kalibratie van het model :
 - gebruik van het model met realistische waarden als invoer,
 - vergelijken van de uitvoer van de simulatie met de situatie in werkelijkheid
 - en aanpassen van het model aan zodat het overeenkomt met de werkelijkheid.
 8. Uitvoeren van de simulaties :
 - formulering van hypothesen en implementatie ervan
 - en testen van deze hypothesen aan de hand van uitgevoerde simulaties.
 9. Interpretatie van de bekomen resultaten :
 - beschouwen van de uitvoer van de simulaties
 - en deze in de juiste context (basisveronderstellingen, tekortkomingen, ... van het model) interpreteren.

Een kleine toelichting bij deze stappen :

1. er worden uitsluitend autosnelwegen gebruikt waarop alle types voertuigen rijden, meestal in opgestopt verkeer. De grootte van het wegennetwerk zal een deel van de Antwerpse Ring omvatten (zie paragraaf 5.2.3 voor meer informatie).
2. Zowel statistische als grafische informatie is nodig, de eerste soort dient om kwantitatieve uitdrukkingen te doen, de tweede om een visuele verificatie te geven van het bestuurdersgedrag op autosnelwegen. Er zijn voertuigtellingen beschikbaar (en dus ook doorstromingsgraden), echter niet op alle nodige punten. De resultaten dienen hoofdzakelijk relatief geïnterpreteerd te worden, het doel is meer om aan te tonen dat er wel of geen verandering onder bepaalde hypothesen optreedt in plaats van deze verandering exact te kunnen bepalen (dus eerder kwalitatief dan kwantitief werken). De toepassing zal niet real-time zijn.
3. In paragraaf 4.2 werd al uitgebreid besproken wat de voor- en nadelen van de verschillende types simulators en hun onderliggende veronderstellingen zijn.
4. Bij mijn weten zijn er geen andere toepasbare middelen beschikbaar die geen ingrijpende en dure wijzigingen in het landschap vereisen. Vandaar de noodzaak om simulaties te verrichten.

Stappen (5), (6), (7), (8) en (9) worden verderop in het derde deel van deze thesis uitgebreid besproken, het is dan ook niet nodig er hier verder op in te gaan.

5.2.2 Antwerpse Ring ?

De titel van deze thesis werd in paragraaf 5.1 al eens onder de loep genomen. Twee woorden, namelijk *Antwerpse Ring*, werden echter nog niet beschouwd.

Indien men de Antwerpse Ring, de R1, in zijn geheel beschouwt dan kan men duidelijk zien dat deze er niet op één, twee, drie gekomen is. Het is het resultaat van jarenlang plannen en bouwen. Als men enkel maar de vorm in ogenschouw neemt dan merkt men dat men eerder van een 'Antwerpse Ringvorm' kan spreken. Inderdaad, de Ring is slechts voor ongeveer driekwart 'gesloten'. In het noorden is er nog een open stuk, het verkeer naar Zwijndrecht en Linkeroever komt hoofdzakelijk terecht op de N49 (ook wel gekend onder de naam Expressweg) en de E17. Sinds kort is er echter sprake van de sluiting van de ring wat het eindstadium zal inluiden van de oorspronkelijke bedoeling : een gesloten ring rond Antwerpen aanbieden [Bov00].

Het meest opmerkelijke aspect aan de R1 is de aanwezigheid van de Kennedy-tunnel. Deze tunnel loopt onder de Schelde en verbindt beide Antwerpse oevers met elkaar. Uit de statistieken blijkt dat er in 1985 ruim 75000 voertuigen per dag (tussen 6 uur 's morgens en 10 uur 's avonds, inclusief weekends) werden geteld. Metingen uitgevoerd in 1998 lieten weten dat er ruim 158500 voertuigen per dag passeerden, dit is ruim een verdubbeling van de verkeersdrukke over een periode van 13 jaar ! De Kennedytunnel wordt beschouwd als zijnde het drukste, kritiekste punt in het Belgische wegenlandschap [Cop99].

Een veel voorkomende vraag die men zich stelt is de volgende : waarom had men indertijd maar drie vakken gelegd op de R1 ? Deze vraag is weliswaar gerechtvaardigd maar men mag niet vergeten dat de verkeerscondities toen veel minder serieus waren dan nu. Een populaire opmerking van vroeger is de volgende : drie vakken, wie gaat die allemaal gebruiken ? Ondertussen is deze vraag beantwoord en dient de volgende stap te gebeuren : wat dient er te veranderen opdat de situatie terug beheersbaar wordt ? En indien dit niet zou lukken : wat dient er te gebeuren opdat de situaties zo goed mogelijk opgevangen worden ? Dit zijn twee verschillende zaken : deze thesis probeert inzicht te geven in het eerste terwijl er op dit moment al aan de tweede vraag wordt gewerkt. Sinds enige tijd bestudeert het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap onze autosnelwegen en speelt ze haar informatie door naar de Rijkswacht die in geval van opstoppingen eventueel actie onderneemt. Men kan hier dus spreken van een zekere verkeerszorg.

5.2.3 Situering

Deze thesis behandelt *niet* de hele Antwerpse Ring. Als we R1 in zijn totaliteit gaan beschouwen dan introduceren we een zeer grote complexiteit omdat we dan :

- op microscopisch vlak de hele wegenstructuur van de R1 , inclusief alle op- en afritten, moeten geometrisch modelleren wat geen sinecure is
- en omdat, indien we al deze op- en afritten willen voorzien van de correcte doorstromingsgraden, we dan zeer veel voertuigtellingen nodig hebben die niet zo evident zijn om aan te raken (niet al wat we nodig hebben is beschikbaar).

Vandaar dat er bepaalde keuzes gemaakt zullen worden en één van die keuzes omvat een beperking op de te modelleren geometrie. Er wordt dus maar een stuk van de Ring gemodelleerd. Figuur 5.1 geeft een goed beeld van welk stuk juist zal worden beschouwd. Dit stuk omvat het einde van de E17, (vanaf Zwijndrecht),

de grote 'driehoek' van autosnelwegen aan de linkeroever van de Schelde, de Kennedytunnel, de R1 tot aan de oprit en afrit van de E19 in de buurt van de Craeybeckstunnel en een klein stukje van de A12. Verder zal er ook drastisch geknipt worden in de op- en afritten langs de R1 omdat het hoofddoel van deze studie meer gericht is op de situatie aan de Kennedytunnel.



Figuur 5.1: Een satellietfoto van het te bestuderen stuk van de R1.

5.3 Conclusies

Dit hoofdstuk adresseerde de problemen die zich bij het weergeven van de doelstellingen van deze thesis manifesteren. Vervolgens werd een bespreking gegeven uit welke onderdelen het pad naar het einddoel bestaat, waarna tot slot kort gekeken werd naar de concrete verkeerssituatie waarop deze thesis betrekking heeft.

Belangrijk is dat de terminologie waarmee gewerkt wordt concreet omschreven kan worden. Zoals in paragraaf 5.1 te lezen viel, blijkt dat dit niet altijd mogelijk is. Hieruit volgt dat we te maken hebben met een in eerste instantie moeilijk doch vrij afgebakend probleem. In het volgende hoofdstuk worden methodes toegelicht die een beter licht op de zaak kunnen werpen. Het is juist de rol van deze methodes om de in dit hoofdstuk besproken problemen zo goed mogelijk aan te pakken. Dit zullen geen perfecte oplossingen zijn maar ze hebben echter wel de eigenschap dat ze de situaties in de werkelijke wereld goed kunnen benaderen.

Hoofdstuk 6

Oplossingsmethodes

Inleiding

Zoals in het vorige hoofdstuk te lezen viel, zijn er nogal wat problemen waarmee afgerekend dient te worden. Er werd toen ook gesuggereerd dat, alhoewel er nu geprobeerd wordt oplossingen aan te reiken, deze oplossingen niet perfect zullen zijn. Inderdaad, het modelleren van een verkeersstroom is een complexe taak, te meer daar men het fenomeen zelf nog niet volledig begrijpt.

Om de hypothesen te testen die verderop in deze thesis worden gepostuleerd, is het noodzakelijk een simulator te hebben die op maat gesneden is voor deze hypothesen. Deze simulator – *Mitrasim 2000* – steunt op het in dit hoofdstuk besproken wiskundig model. Er zal besproken worden welke keuzes tijdens de ontwikkeling gemaakt werden en de motivaties daartoe. Daarna wordt het wiskundig model zelf toegelicht en tenslotte wordt de implementatie van de simulator besproken.

Alvorens dit model te bestuderen zal er eerst en vooral nagegaan worden welke middelen er beschikbaar zijn om dit doel te bereiken en in welke mate deze gebruikt kunnen worden.

Het hiernavolgend werk – en dan vooral de constructie van het onderliggend wiskundig model – is gebaseerd op [Has99, Rot96, Ahm99, LR96, Kou99a, MIT98, Yan97, CWM94, DCM94] en een grote dosis menselijke intuïtie en inventiviteit van mijnentwege.

6.1 Evaluatiemethodes

Met de hedendaagse technologie is het mogelijk meer gesofistikeerde verkeersbeheer-systemen te ontwikkelen. De ervaring heeft daarentegen wel aangetoond dat deze systemen niet allen even effectief zijn. Evaluatie is daarom een belangrijk element tijdens de ontwikkeling.

Om het effect van dergelijke systemen en het resultaat van hypothesen te testen zijn er twee belangrijke mogelijkheden beschikbaar : veldtesten en computersimulaties. In dit deel, dat gebaseerd is op [Yan97], worden de voor- en nadelen van beide methodes besproken.

6.1.1 Veldtesten

Voordelen

Veldtesten zijn altijd al een belangrijk element geweest in de evaluatie van verkeersbeheer-systemen. Indien deze systemen reeds operationeel zijn dan kunnen veldtesten gebruikt worden om de performantie van deze systemen te bestuderen. Daarenboven kunnen ook talrijke andere praktische aspecten van dergelijke systemen onder de loep worden genomen.

Een groot voordeel is dat veldtesten directe gegevens kunnen opleveren : het is bijvoorbeeld mogelijk om een testvoertuig in de verkeersstroom te plaatsen om op deze manier directe gegevens te verzamelen. Deze gegevens omvatten onder andere reistijden, afgelegde afstanden, snelheden, . . .

Merk op dat veldtesten ergens wel noodzakelijk zijn : men dient immers praktisch altijd te beschikken over voertuigtellingen om bijvoorbeeld doorstromingsgraden te berekenen en te gebruiken. Om dit te bewerkstelligen worden metingen verricht door lusdetectoren en camera's.

Nadelen

Het grote nadeel van veldtesten is de kostprijs. Deze omvat bijvoorbeeld het plaatsen van lusdetectoren en camera's, het gebruik ervan, werkuren die betaald moeten worden. Indien men testvoertuigen gaat gebruiken dan loopt de kostprijs snel op : gaande van eenvoudige metingen in een verkeersstroom tot de implementatie van Intelligente Transport Systemen. Het effect van de hoge kostprijs is dat er keuzes gemaakt worden die bepalen welke veldtesten in aanmerking komen en welke niet.

Dan is er ook nog de noodzakelijke voorwaarde dat het systeem operationeel dient te zijn alvorens er nog maar enige tests kunnen uitgevoerd worden en een ander groot nadeel is dat men niet zomaar kan ingrijpen in een verkeerssituatie. Indien men bijvoorbeeld het effect wil nagaan van het afsluiten van een rijvak dan kan men een file induceren door dit rijvak effectief af te sluiten (bijvoorbeeld door de Verkeerspolitie en/of Rijkswacht). Maar, dit is niet altijd mogelijk, omdat het nut van het experiment meestal niet opweegt tegen de talrijke economische factoren die in rekening gebracht dienen te worden (denk maar aan het te laat komen van goederen, de in het gedrang gebrachte verkeersveiligheid door de introductie van een opzettelijke file, ...).

6.1.2 Computersimulaties

De grote tegenhangers van veldtesten zijn de computersimulaties. De laatste jaren is simulatie een populaire manier van werken geworden om de effectiviteit van bepaalde systemen vast te stellen.

Voordelen

Het voordeel bij uitstek is het feit dat computersimulaties toelaten om testen uit te voeren onder gecontroleerde omstandigheden. Men kan desgewenst de modellen waarop de simulaties gebaseerd zijn, aanpassen en verfijnen, wat niet zo'n triviale zaak is bij het uitvoeren van veldtesten (men kan een verkeerssituatie niet zomaar wijzigen).

Verder zijn computersimulaties in hoge mate adaptief. Dit wil dan ook zeggen dat men op gemakkelijke wijze nieuwe concepten kan introduceren, bestaande concepten aanpassen en/of verwijderen. De tests die gedaan worden kunnen dan zeer specifiek genomen worden (bijvoorbeeld de reistijd van één enkele bestuurder) of zeer algemeen (bijvoorbeeld de doorstromingsgraad op een bepaald stuk van de rijbaan).

Nadelen

Zoals in paragraaf 5.1 al werd vermeld heeft men bij de studie naar verkeersstromen af te rekenen met inherente problemen die gegrond zitten in de aard van de verkeersstromen zelf. Men kent niet alle variabelen van het systeem en vermits een computermodel maar oplevert wat je erin steekt, is dit een grote tekortkoming. De test zal maar zo goed zijn als het model zelf. Op dit vlak heeft de ontwikkelaar

dan de keuze of hij macroscopisch of microscopisch gaat werken en vervolgens dient hij specifiekere keuzes te maken die het model zelf gaan bepalen.

Het testen van Intelligente Transport Systemen is met computersimulaties geen triviale bedoening. De functionaliteit van de gebruikte modellen moet welomschreven zijn en het gedrag ervan moet realistisch zijn. Dit maakt kalibratie noodzakelijk en daarvoor zijn dan weer veldtesten nodig.

6.1.3 Conclusies

Na alle voor- en nadelen afgewogen te hebben was de keuze eenvoudig : computersimulaties. Goede motivaties hiervoor zijn dat er een controleerbare omgeving ter beschikking staat en dat de flexibiliteit aanzienlijk hoger is dan het rechtstreeks uitvoeren van veldtesten. Het doorslaggevend argument is natuurlijk dat de hypothesen in praktijk moeilijk te testen zijn op een directe manier. Een computermodel lost dit probleem volledig op. Hiermee verwant is het feit dat ik zelf geen complete veldtesten kan uitvoeren waardoor een computer zeer goed van pas komt.

In dit kader is het vermeldenswaard dat er al serieuze moeite gedaan werd voor het implementeren van een ‘testlabo’ : in Virginia werd door het Virginia Tech Center for Transportation Research een testbed ontwikkeld onder de naam ‘The Smart Road’. Dit testbed is een stuk autosnelweg dat volledig gecontroleerd kan worden op het vlak van verlichting, simuleren van zeer uiteenlopende weersomstandigheden (dankzij speciaal daartoe voorziene installaties langs de rand van de weg), variërende types rijweg (zoals asfalt, beton, ...). Men verwacht dat tussen 2010 en 2020 de autosnelweg volledig operationeel zal zijn (twee vakken per rijrichting) en ten volle benut zal worden (men zal hem verbinden met een bestaande, veel gebruikte autosnelweg) [VTC96].

6.2 Enkele gemaakte keuzes

In dit deel worden enkele algemeen gemaakte keuzes toegelicht en de motivaties daartoe besproken. De constructie van de simulator is een proces waarvan sommige delen meerdere keren bestudeerd worden. Het gevolg is een uitgebreide lijst van keuzes die beslissend waren voor het uiteindelijke resultaat. Vandaar dit deel dat in detail toelicht waarom sommige parameters wel en andere parameters niet worden gemodelleerd.

6.2.1 Type simulator

Zoals in de inleiding van deze thesis reeds vermeld werd, zal de uiteindelijke simulator – *Mitrasim 2000* – microscopisch van aard zijn. De belangrijkste motivatie hiertoe is dat de hypothesen die verderop in deze thesis aan bod komen niet macroscopisch te toetsen zijn. Een macroscopische simulator kan bijvoorbeeld niet gebruikt worden bij een analyse van het gedrag van bestuurders. Een microscopische simulator kan dit wel aangezien zaken zoals middenvakrijders, conservatieve en agressieve bestuurders, soorten voertuigen, . . . eenvoudig gemodelleerd kunnen worden. In deze thesis is het gebruik van een microscopisch model noodzakelijk aangezien de aard van de hypothesen dit vereist. Het is bijvoorbeeld niet zo logisch om de invloed van een extra vak te modelleren aan de hand van een macroscopisch model. Men kan bij dit laatste enkel bijvoorbeeld de doorstromingsgraad aanpassen, maar dat is juist de informatie die verkregen moet worden ! Merk nochtans op dat uit microscopische gegevens de macroscopische grootheden afgeleid kunnen worden, het omgekeerde is echter niet waar.

Eens het type van de simulator vastgesteld is, weten we dat – paragraaf 4.2.5 in het achterhoofd houdende – er enkele vrij belangrijke componenten in het wiskundig model aanwezig zullen zijn :

- karakteristieken van bestuurders en voertuigen,
- een voertuig-volg model,
- een vak-verander model
- en reismwegen van de voertuigen.

Deze worden dus expliciet gemodelleerd. De simulator is discreet van aard en klok-gedreven. De tijdsstap ω van de simulatiecyclus zal 0,1 s bedragen. Dit is een veel voorkomende waarde bij microscopische simulators (er zijn er die 0,5 s gebruiken maar me dunkt dat bij het beschouwen van vakveranderingen dit een te grove benadering is).

Opmerking : het is niet omdat ik opteer voor een microscopisch model dat ik denk dat een macroscopisch model ongeschikt is. In tegendeel, er worden zelfs goed gemotiveerde studies verricht naar het gebruik van wachtrij-modellen (dit zijn macroscopische simulators) [WV00, VWV00]. Ideaal zou een combinatie van beide types zijn zoals dat gebeurt in SIMLAB aan het MIT (zie paragraaf 4.3.3).

6.2.2 Weersomstandigheden

Ik heb ervoor gekozen om *geen* weersomstandigheden te modelleren. Ik kwam tot deze beslissing na een persoonlijke ervaring hiermee en een email met Qi Yang, één van de personen werkend aan MITSIM. Een kleine toelichting. . .

Ik had vroeger reeds Mitrasim v1.0 ontwikkeld, een simulator die het verkeer op een recht stuk autosnelweg nabootste. In deze simulator was een optie beschikbaar waarmee gekozen kon worden tussen zonnig weer en regenweer. Het kwam erop neer dat er wat werd gespeeld met de zichtbaarheid maar er werd geen rekening gehouden met de vergrootte remafstanden en het feit dat bestuurders meer op hun hoede zijn in slecht weer. Ik had echter geen gegevens voorhanden om de simulator goed te kalibreren wat ertoe leidde dat ik een ‘goede schatting’ van de parameters in het model had gestoken. Echter, zoals verwacht, kan men op dat moment niet meer afgaan op de betrouwbaarheid van deze simulator.

In een email die Qi Yang mij eind december '99 terugstuurde antwoordde hij, op de vraag of hij daar al ervaring mee had en eventueel tips kon geven, het volgende :

De waarheid is dat nog niemand in onze groep studies naar de invloed van weersomstandigheden heeft verricht. Ik verwacht wel dat weersomstandigheden in microscopische simulators gemodelleerd kunnen worden door (1) de zichtbaarheid te variëren, (2) de reactietijden van de bestuurders aan te passen, (3) de maximale versnelling, maximale en normale vertraging van de voertuigen aan te passen et cetera. Echter, het probleem dat zich stelt is dat we misschien geen gegevens voorhanden hebben om deze parameters te kalibreren. Het bekomen van dergelijke data is trouwens redelijk duur. Op het einde kan je dan in een situatie komen waarin je puur werkt met schattingen en gevoeligheidsstudies.

Qi Yang gebruikte de term *guestimates*, wat perfect illustreert waar je uiteindelijk zal aanbelanden : het zijn niet alleen schattingen (*estimates*) van je parameters die je doet maar daarenboven ook nog eens gokken (*guesses*) wat de wetenschappelijkheid van een dergelijk onderzoeksmiddel toch wel in twijfel trekt.

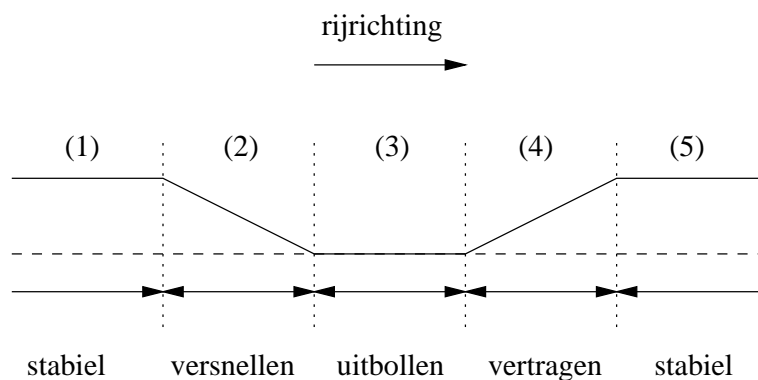
6.2.3 Karakteristieken van de rijbaan

Op onze Belgische autosnelwegen liggen verschillende soorten wegdekbedekking. Deze varieert van zuivere asfalt tot fluisterasfalt, beton en op bepaalde stukken waar wegenwerken aan de gang zijn zelfs afgeschraapte asfaltlagen. In combinatie

met de weersomstandigheden kan dit een grote invloed hebben : de ongevallen die gebeuren op het gevaarlijke fluisterasfalt tijdens hevig vriesweer en dooi zijn niet toevallig. Om dit alles te modelleren zijn er weerom geen kalibratiegegevens voorhanden. In theorie zou men ook kunnen zeggen dat de samenwerking tussen wegdek en bandentype ook een rol speelt (banden die ‘plakken’ aan het wegdek) maar ook daar zijn geen gegevens over terug te vinden die ik direct kan gebruiken. Me dunkt dat het ook niet noodzakelijk is dat deze parameter gemodelleerd wordt om realistische voorspellingen te kunnen doen.

Wat de geometrie van de rijbaan betreft heb ik twee keuzes gemaakt : de kromming van de rijbaan wordt niet gemodelleerd maar de helling van de rijbaan wel. Qi Yang raadde me aan om de kromming niet direct in het model te integreren aangezien er geldt dat hoe meer detail je in de simulator stopt, hoe moeilijker het wordt om deze te kalibreren (als er al geschikte gegevens voorhanden zouden zijn). In plaats daarvan stelde hij voor dat de rijbaan in delen wordt gesplitst zodat op elk deel dezelfde geometrische karakteristieken gelden. Het modelleren krijgt dan een concrete vorm door met het stuk rijbaan een zekere snelheid voor vrij verkeer te associëren. Deze laatste techniek werd me ook aangeraden door Tomer Toledo, een doctoraatsstudent aan het Massachusetts Institute of Technology, werkend aan de ontwikkeling van Intelligente Transport Systemen. Een mogelijke implementatie daarvan zou inhouden dat de snelheidsbeperking op een gekromde rijbaan lager wordt genomen dan op een rechte rijbaan zodat de bestuurders automatisch trager gaan rijden.

De helling van de rijbaan zal gebruikt worden in het versnellingsvermogen van een voertuig (een voertuig neemt een helling met meer moeite dan een vlakke rijbaan), zie paragraaf 6.3.3 voor meer details hieromtrent. Dit laatste uit zich bijvoorbeeld in het tunneleffect (de naamgeving berust bij mij) :



Figuur 6.1: Het tunneleffect.

Figuur 6.1 illustreert wat er gebeurt wanneer voertuigen een tunnel in- en uitrij-

den : (1) de bestuurder van een voertuig rijdt met een bepaalde snelheid, (2) hij komt de tunnel binnengereden op een afhellende rijbaan waardoor zijn voertuig sneller zal gaan rijden, (3) de bestuurder komt terecht op een vlakke rijbaan in de tunnel waardoor zijn voertuig aan snelheid zal minderen (weliswaar niet al te veel aangezien de bestuurder zijn voet op het gaspedaal houdt en bijgevolg geen positieve versnelling introduceert), (4) het voertuig nadert het einde van de tunnel en komt terecht op het hellend stuk van de rijbaan waardoor het sterk aan snelheid verliest en tenslotte (5) waar het voertuig uit de tunnel is en terug op een vlak stuk rijbaan rijdt en de bestuurder zijn snelheid terug opdrijft tot de oorspronkelijke snelheid die hij in (1) had.

Door mezelfde uitgevoerde experimenten (namelijk het opzettelijk volgen van een voertuig en het gedrag ervan nabootsen), leverden op dat bijna *alle* bestuurders *geen* compensatie doorvoeren in fases (2), (3) en (4) wat hun ‘grillig’ rijgedrag verklaart. Het verlies aan snelheid is in fase (4) soms zo sterk dat ze onder hun gewenste snelheid duiken. Een voorbeeld : in de Waaslandtunnel tussen Linkeroever en Antwerpen geldt een snelheidsbeperking van 50 km/u. Bij het inrijden van de tunnel rijden veel mensen weliswaar te hard maar ze vertonen allen hetzelfde gedrag : in plaats van bijvoorbeeld 50 km/u halen ze door de afhelling soms snelheden van wel 70 km/u, op het vlakke stuk daalt die snelheid dan tot ongeveer 60 km/u en van zodra ze op de helling komen zakt hun snelheid soms tot onder 40 km/u !

Om als bestuurder dit effect tegen te gaan is er wel wat moeite nodig : het vereist dat bij het binnenrijden van de tunnel de rechtervoet lichtjes druk mindert op het gaspedaal waarna stelselmatig de druk terug wordt opgebouwd totdat men uit de tunnel is en op een vlakke rijbaan rijdt.

Merk op dat ik spreek van het tunneleffect maar dat deze redenering uiteraard ook perfect opgaat voor andere soorten hellingen zoals bruggen en dergelijke.

6.2.4 Menselijke factoren

In paragraaf 3.1.8 werd reeds vermeld dat de in paragraaf 3.1 besproken menselijke factoren onmogelijk allemaal gemodelleerd kunnen worden. Dit zou het model niet alleen zeer complex maken, maar we zouden weerom af te rekenen hebben met parameters die niet gekalibreerd kunnen worden daar er geen geschikte gegevens voorhanden zijn (en dus met ‘*guesimates*’ werken zoals Qi Yang suggereerde).

Dit brengt met zich mee dat volgende factoren *niet* gemodelleerd worden :

- de zichtbaarheid van andere voertuigen, verkeersborden, . . . ,

- het geslacht van de bestuurders,
- de leeftijd van de bestuurders
- en eventuele aantastingen van de bestuurders (mindervaliden, dronkenschap, ...).

Waarschijnlijk zijn er nog factoren die niet gemodelleerd worden maar zoals reeds eerder gesteld is de lijst van menselijke factoren niet exhaustief.

Factoren die *wel* gemodelleerd worden zijn :

- de reactietijd (dit is de som van waarnemingsreactietijd en de bewegingstijd aangezien deze beiden moeilijk experimenteel van elkaar te onderscheiden zijn),
- een bestuurder zal soms van vak *moeten* veranderen (MLC) om een afrit te nemen, de nog resterende afstand van het voertuig tot de afrit is dan bepalend.
- En de agressie van een bestuurder.

De agressie van bestuurders wordt op haar beurt gekenmerkt door volgende verschillende factoren :

- de kritische grootte van de opening bij het veranderen van vak (agressieve bestuurders nemen genoeg met kleinere openingen dan de meer conservatieve bestuurders die het liever veilig houden),
- de mate waarin een bestuurder de snelheidsbeperking overtreedt (agressieve bestuurders overtreden de snelheidsbeperkingen vaak zwaar)
- en de afstand tot waarop een voertuig zijn voorligger nadert (agressieve bestuurders gaan zeer dikwijls heel dicht achter hun voorligger rijden (bijna 'bumper tegen bumper') om deze opzij te dwingen zodat ze hun 'snelle reis' kunnen verderzetten.

Vooraf de laatste factor is belangrijk : in België vertonen de bestuurders een zeer agressief rijgedrag, het model moet hier dan ook op voorzien zijn.

In dit model is er geen correlatie tussen de reactietijd en de agressie van bestuurders. Een mogelijk verband is het onderzoeken waard maar ik ben de mening toegedaan dat het niet eenvoudig is om een dergelijk verband op te sporen, te modelleren en te verifiëren.

6.2.5 Conclusies

In dit deel werd toegelicht welk factoren wel en welke factoren niet gemodelleerd worden. Al deze keuzes bepalen de uiteindelijke complexiteit die deel uitmaakt van de simulator. De gevolgen ervan uiten zich in de manier waarop bepaalde factoren geïmplementeerd worden in het computerprogramma.

6.3 Het wiskundig model

In dit deel wordt het onderliggend wiskundig model van de simulator – Mitrasim 2000 – besproken. De logische opbouw wordt uit de doeken gedaan door de veronderstellingen en kritische componenten van de simulator toe te lichten.

6.3.1 Het wegennetwerk

Het wegennetwerk waarmee Mitrasim 2000 werkt, is topologisch gezien een gerichte graf. Het netwerk bestaat uit een verzameling knooppunten en verbindingen. Geografisch gezien is er wel een verschil in interpretatie :

Geografisch : een verbinding bevat twee of meer knooppunten. Minstens twee omdat het start- en eindpunt gekend moeten zijn en eventueel meer omdat op deze manier de ligging van de link bepaald wordt. De knooppunten zijn eigenlijk controlepunten die door een Catmull-Rom spline geïnterpoleerd worden. De basismatrix voor dit type spline is [FvDFH90] :

$$M_{CR} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6.1)$$

Op basis van de segmenten waaruit een verbinding bestaat kan de totale lengte van de verbinding berekend worden door de lengtes van alle segmenten op te tellen. De lengte van 1 segment wordt gegeven door :

$$\int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dQ_x(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dQ_y(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dQ_z(t)}{dt}\right)^2} dt, \quad (6.2)$$

waarbij de $Q(t)$ de parametrische kubische krommen zijn die de geometrie van het segment beschrijven langs de X -, Y - en Z -as. De integraal in

vergelijking 6.2 wordt vervolgens geïdentificeerd met volgende specifieke integraal :

$$\int_0^1 \sqrt{At^4 + Bt^3 + Ct^2 + Dt + E} dt. \quad (6.3)$$

Nadat de coëfficiënten A , B , C , D en E zijn berekend, wordt de integraal benaderd (analytisch oplossen van deze integraal is veel te complex) met volgende formule :

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f\left(a + \left(i \frac{b-a}{n}\right)\right). \quad (6.4)$$

De parameter n in vergelijking 6.4 wordt standaard op 1024 ingesteld wat een goede benadering van de werkelijke lengte van het segment in kwestie oplevert (de fout die gemaakt werd was – na door zelf empirische testen uit te voeren – kleiner dan 10 cm).

Naast de lengte van een verbinding (die berekend wordt aan de hand van de kromming die de verbinding beschrijft) wordt ook de helling van de verbinding berekend. Dit gebeurt als volgt :

$$\text{Helling}_{Q_i} = \frac{100}{\text{Lengte}_{Q_i}} (n_{i+1_z} - n_{i_z}). \quad (6.5)$$

De parameters in vergelijking 6.5 zijn n_{i+1_z} and n_{i_z} die de Z -coördinaat van knooppunten $i + 1$ en i van de verbinding zijn. Deze helling wordt uitgedrukt in een percentage : 10 % wil zeggen dat men over een afstand van 100 m een stijging van 10 m ondergaat (negatieve waarden zijn uiteraard ook toegestaan).

Topologisch : een verbinding bevat slechts twee knooppunten, namelijk de begin- en eindpunten. De kromming van een verbinding wordt zoals reeds eerder vermeld niet actief in het model gebruikt, het enige waarvoor deze wel gebruikt wordt, is om de totale lengte van een verbinding te berekenen. De gerichte graf werkt dus met een aantal verbindingen die elk een specifieke lengte en helling hebben.

Er zijn verschillende soorten knooppunten : oorsprongen (langs hier komen voertuigen het wegennetwerk binnen), bestemmingen (langs hier verlaten voertuigen het wegennetwerk), verbindingsknooppunten (deze koppelen twee verbindingen

aan elkaar), bochten (die de geografische vorm van een verbinding beschrijven) en omgevingsknooppunten (die gebruikt worden voor extra geografische informatie).

Net zoals de knooppunten zijn er ook verschillende soorten verbindingen, al naar gelang de taak die ze moeten vervullen : er zijn op- en afritten, gewone autosnelwegen en verbredingen en versmallingen (zie tabel C.1 op pagina 180 voor een overzicht). Het hele netwerk bestaat uit allerlei puzzelstukjes (de verbindingen) die perfect in elkaar passen (het aantal vakken bij de aansluiting van twee verbindingen moet kloppen). Andere karakteristieken van verbinding zijn de snelheidsbeperking die geldt op de rijbaan, de ligging van de oprit/afrit (links of rechts) en een optionele naam.

6.3.2 De karakteristieken van de bestuurders

In *Mitrasim 2000* krijgen bestuurders een aantal karakteristieken toebedeeld waarvan de waarden voortkomen uit statistische verdelingen. Zoals in paragraaf 3.1.8 is vermeld, worden niet alle menselijke factoren als karakteristieken van bestuurders gebruikt. Hierna volgt een overzicht van welke factoren/karakteristieken essentieel zijn voor het model :

Reactietijd : deze wordt voor elke bestuurder bepaald wanneer hij in de simulatie wordt opgenomen (dit is : wanneer het voertuig het wegennetwerk betreedt). De reactietijd τ wordt bepaald aan de hand van een afgekapte lognormale verdeling [Rou94] met gemiddelde τ_m , variantie τ_{s^2} , minimum τ_{min} en maximum τ_{max} . De waarden waarop de statistische verdeling van de reactietijd gebaseerd is, werden empirisch bekomen door verschillende proefpersonen aan een reeks tests te onderwerpen (zie paragraaf 7.1 voor meer informatie omtrent de tests en de constructie van de statistische verdeling). Merk op dat de reactietijd van een bestuurder altijd dezelfde is en dus niet afhankelijk is van de omstandigheden (zoals opstopping , vrij verkeer, ...).

Agressie : de waarde van deze parameter η wordt berekend aan de hand van een uniforme verdeling op het interval $[0, 1]$. Hierbij geldt dat 0 op een uiterst conservatieve bestuurder en 1 op een uiterst agressieve bestuurder duidt.

Middenvakrijder : het Belgisch verkeersreglement schrijft voor dat een voertuig op een autosnelweg er steeds naar moet streven om uiterst rechts te rijden. Veel bestuurders treden deze regel echter met de voeten wat maakt dat er een flink aantal ‘middenvakrijders’ zijn die gedurende zeer lange tijd het uiterste rechtse rijvak mijden, ook al zitten ze in vrij verkeer. Onderzoek

naar de invloed van middenvakrijders vereist dat dit gedrag in het model wordt opgenomen. Vandaar dat elke bestuurder al dan niet als ‘middenvakrijder’ bestempeld wordt. De waarde van deze parameter wordt bepaald aan de hand van het *percentage* middenvakrijders die deel uitmaken van de verkeersstroom.

Gewenste snelheid : elke bestuurder heeft een zekere snelheid die hij wenst aan te houden tijdens de reis door het wegennetwerk. Deze snelheid wordt gedefinieerd als :

$$v^{gewenst} = \min\{v^{beperving} + \nu, v^{max}\}, \quad (6.6)$$

met $v^{gewenst}$ de gewenste snelheid van de bestuurder, $v^{beperving}$ de snelheidsbeperving die op de verbinding geldt, ν een parameter die bepaalt met welke extra snelheid een bestuurder de snelheidsbeperving overtreedt (zie tabel C.3 op pagina 185) en v^{max} de maximale snelheid die het voertuig kan halen op de verbinding (deze is afhankelijk van de helling van het segment en het soort voertuig, zie tabel C.5 op pagina 186). Merk op dat de gewenste snelheid dus afhankelijk is van de verbinding waarop het voertuig zich bevindt.

Tolerantie voor gewenste snelheid : deze parameter (λ) beschrijft hoe snel een bestuurder tevreden is met de snelheid van het voertuig ; conservatieve bestuurders zijn sneller tevreden dan agressieve bestuurders. Volgende vergelijking wordt gebruikt om de tolerantie te berekenen :

$$\lambda = (1 - \eta) \cdot 20 \text{ km/u.} \quad (6.7)$$

Uit vergelijking 6.7 is af te leiden dat een conservatieve bestuurder vrij snel tevreden is met de snelheid van zijn voertuig terwijl een agressieve bestuurder daarentegen ernaar zal streven om zijn gewenste snelheid zo goed mogelijk te bereiken.

Modelparameters : naast de hoger vermelde karakteristieken zijn er ook nog enkele parameters die het gedrag van de bestuurders weergeven in het voertuig-volg en vak-verander model. Beide modellen – en hun respectievelijke benodigde parameters – worden uitgebreid besproken in paragrafen 6.3.4 en 6.3.5.

6.3.3 De karakteristieken van de voertuigen

Net zoals de bestuurders hebben ook de voertuigen bepaalde karakteristieken die hun rijgedrag bepalen. Deze karakteristieken hebben in dit geval meestal be-

trekking op de snelheden die de voertuigen kunnen halen en in welk tempo ze dit kunnen, namelijk het vermogen tot versnellen en vertragen. Daarnaast is er ook nog de grootte en het type van het voertuig. De karakteristieken van de voertuigen zijn afhankelijk van het soort voertuig, dit in tegenstelling tot de karakteristieken van de bestuurders die willekeurig worden toegewezen (weliswaar gebaseerd op statistische verdelingen). Volgende karakteristieken worden opgenomen in het wiskundig model :

Soort voertuig : ik heb ervoor gekozen om slechts twee soorten voertuigen te modelleren, namelijk *personenwagens* en *vrachtwagens*. Me dunkt dat het niet noodzakelijk is om ook nog eens autobussen, bestelwagens, motorfietsen, ... te beschouwen, al is bijvoorbeeld onderzoek naar de aanwezigheid en het gedrag van motorfietsen in het verkeer wel een interessante studie. De verdeling van beide soorten wordt bepaald door een vlootmix (*fleet-mix*) die weergeeft hoeveel procent personenwagens er zijn (en het resterende procent vrachtwagens).

Hoogte, lengte en breedte : deze waarden worden per soort voertuig vastgelegd zodat alle personenwagens in het model dezelfde vorm hebben, hetzelfde geldt voor alle vrachtwagens. Ik denk niet dat het nodig is om hier statistische verdelingen te gaan gebruiken aangezien de kleine verschillen die dan optreden niet belangrijk zijn. De dimensies van deze twee soorten voertuigen heb ik zelf opgemeten : de personenwagen was een Opel Kadett (bouwjaar 1991) met koffer en de vrachtwagen was een Volvo 380 (turbo diesel, computergestuurd met ingebouwde cruise-control) met opligger. Zie tabel C.4 op pagina 186 voor de gemeten waarden.

Maximale versnelling : deze wordt gedefinieerd als :

$$a_{h,v}^+ = a_{v,v}^+ - \frac{hg}{100}, \quad (6.8)$$

met $a_{h,v}^+$ de maximale versnelling met snelheid v op een helling h , $a_{v,v}^+$ de maximale versnelling met snelheid v op een vlakke rijbaan (zie tabel C.6 op pagina 186), h de helling van de rijbaan (zie paragraaf 6.3.1 voor de definitie van h) en g de gravitatieconstante ($9,81 \text{ m/s}^2$). Het effect hiervan is dat voertuigen meer moeite met hellingen zullen hebben (wat zich manifesteert in het zogenaamde tunneleffect vermeld in paragraaf 6.2.3).

Normale vertraging : deze parameter (a_v^-) is afhankelijk van het soort voertuig en de snelheid van dit voertuig (zie tabel C.7 op pagina 186).

Maximale vertraging : deze parameter (a_v^{max-}) is afhankelijk van het soort voertuig en de snelheid van dit voertuig (zie tabel C.8 op pagina 187).

Naast dit alles heeft elk voertuig een unieke nummerplaat, wat identificatie in de simulator mogelijk maakt. Deze nummerplaat begint altijd met de letters 'MV' (wat staat voor Mitrasim Vehicle), vervolgens komt het nummer van het knooppunt waar het voertuig het wegennetwerk betrad en tenslotte komt er de tijd (uitgedrukt in kloktikken) toen het voertuig werd aangemaakt. Een voorbeeld : MV-2033-227800, wat leert dat dit voertuig via knooppunt 2033 het wegennetwerk betrad op tijdstip 227800 (dit is ongeveer rond 06:20).

6.3.4 Het voertuig-volg model

Het voertuig-volg model beschrijft het gedrag van een voertuig wanneer het achter een ander voertuig aanrijdt of wanneer het voertuig niet wordt 'gehinderd' door een voorligger. In dit model is er dus nergens sprake van vakveranderingen die de bestuurder wenst te maken, dat is de taak van het vak-verander model.

Zoals in paragraaf 3.2.3 reeds aangehaald werd, is de versnelling (respons) afhankelijk van een door de bestuurder geobserveerde stimulus en een daaraan gekoppelde gevoeligheid (zie vergelijking 3.12). Dit uit zich in het feit dat de versnelling pas toegepast wordt op tijdstip t dat τ s later komt dan de stimulus en gevoeligheid (waarbij τ de reactietijd van de bestuurder is).

Het verschil tussen het wel en niet achter een voertuig aanrijden wordt bepaald door de tussenruimte of volgafstand $d_{volg}(t - \tau_n)$ die er tussen het voertuig van de bestuurder en zijn voorligger op tijdstip $(t - \tau_n)$ heerst. Echter, in de literatuur vindt men veelal een andere manier terug, namelijk het beschouwen van de tussentijd. Onderzoek wees uit dat bestuurders eerder een zekere tussentijd laten in plaats van een zekere tussenruimte met het voertuig voorop [Ahm99]. Een andere belangrijke reden is dat bij het berekenen van de tussentijd de snelheid van het voertuig in acht wordt genomen, wat bij het berekenen van de tussenruimte niet het geval is.

Deze tussentijd $t_{volg}(t - \tau_n)$ wordt als volgt berekend :

$$t_{volg}(t - \tau_n) = \frac{d_{volg}(t - \tau_n)}{v_n(t - \tau_n)}, \quad (6.9)$$

met $v_n(t - \tau_n)$ de snelheid van bestuurder n op tijdstip $(t - \tau_n)$. Indien het voertuig stilstaat ($v_n(t - \tau_n) = 0$) dan wordt enkel de tussenruimte beschouwd.

Op basis van deze tussentijd wordt een voertuig in één van volgende drie regimes geklasseerd :

1. het vrij-stromend regime,
2. het voertuig-volg regime
3. of het noodtoestand regime.

Twee parameters bepalen het regime waarin een voertuig zich bevindt :

- t_{volg}^{min} , de ondergrens voor de tussentijd
- en t_{volg}^{max} , de bovengrens voor de tussentijd.

Merk op dat de tussenruimte wordt beschouwd indien de snelheid van een voertuig 0 is. Deze bepaalt dan op haar beurt weer het regime waarin een voertuig zich bevindt door d_{volg}^{min} , de minimale tussenruimte te beschouwen.

Deze drie parameters worden aan elke bestuurder toegewezen op basis van zijn agressie η :

$$t_{volg}^{min} = \frac{1}{10} \text{ s} + ((1 - \eta) \cdot \frac{1}{2} \text{ s}) \quad (6.10)$$

$$t_{volg}^{max} = \frac{7}{10} \text{ s} + ((1 - \eta) \cdot 1 \text{ s}) \quad (6.11)$$

$$d_{volg}^{min} = \frac{1}{2} \text{ m} + ((1 - \eta) \cdot 1 \text{ m}). \quad (6.12)$$

Deze basiswaarden voor deze parameters zijn ook terug te vinden in tabel C.10 op pagina 188.

De verschillende regimes worden nu stuk per stuk toegelicht :

Het vrij-stromend regime

Indien

$$t_{volg}(t - \tau_n) > t_{volg}^{max}, \quad (6.13)$$

dan bevindt het voertuig zich in het vrij-stromend regime. De bestuurder zal er dan naar streven om zijn gewenste snelheid te bereiken. Dit doet hij door ofwel

te versnellen (met de maximale versnelling van het voertuig) ofwel te vertragen (met de normale vertraging van het voertuig).

Wiskundig wordt dit als volgt uitgedrukt :

$$a_n(t) = \begin{cases} a_{h,v}^+ & \text{als } v_n(t - \tau_n) < (v_n^{gewenst} - \lambda_n) \\ 0 & \text{als } v_n(t - \tau_n) \in [v_n^{gewenst} \pm \lambda_n] \\ a_v^- & \text{als } v_n(t - \tau_n) > (v_n^{gewenst} + \lambda_n), \end{cases} \quad (6.14)$$

met $a_n(t)$ de versnelling die bestuurder n op tijdstip t uitoefent, $a_{h,v}^+$ de maximale versnelling van het voertuig dat een snelheid v_n heeft op tijdstip $(t - \tau)$ met τ_n de reactietijd van bestuurder n , $v_n^{gewenst}$ de gewenste snelheid van de bestuurder in kwestie, λ_n de tolerantie van de bestuurder voor de gewenste snelheid en a_v^- de normale vertraging van het voertuig bij snelheid v_n .

Het voertuig-volg regime

Indien

$$t_{volg}^{min} \leq t_{volg}(t) \leq t_{volg}^{max}, \quad (6.15)$$

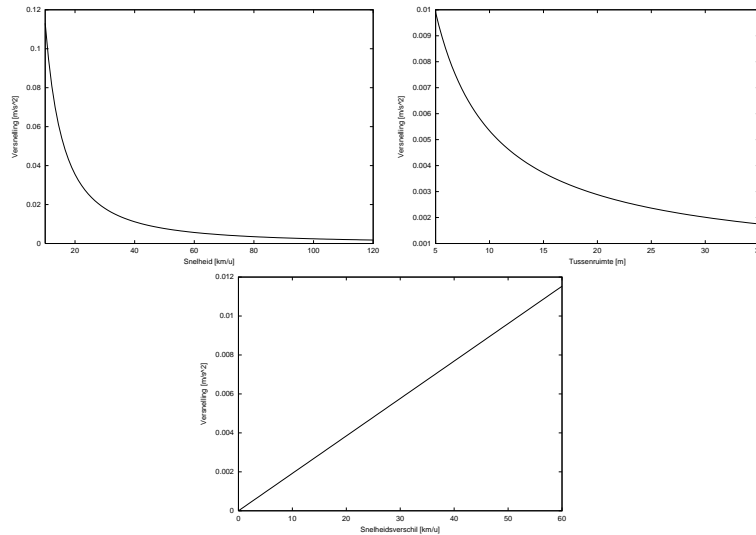
dan bevindt het voertuig zich in het voertuig-volg regime. In dit geval wordt een voertuig-volg model gebaseerd op vergelijking 3.17 uit paragraaf 3.2.3 gebruikt :

$$a_n(t) = \alpha^\pm \frac{V_n(t)^{\beta^\pm}}{d_{volg}(t)^{\gamma^\pm}} \Delta V_n^{voorligger}(t), \quad (6.16)$$

waarbij $a_n(t)$ de versnelling is van het voertuig van bestuurder n op tijdstip t , $V_n(t)$ de snelheid van het voertuig van de bestuurder op tijdstip t , $\Delta V_n^{voorligger}(t) = V_n^{voorligger}(t) - V_n(t)$, $V_n^{voorligger}(t)$ de snelheid van het voertuig van de bestuurder die voor het voertuig van bestuurder n op tijdstip t rijdt en α^\pm , β^\pm en γ^\pm modelparameters. De modelparameters worden onderverdeeld in α^+ , β^+ en γ^+ die gebruikt worden bij het versnellen ($V_n(t - \tau_n) < V_n^{voorligger}(t - \tau_n)$) en α^- , β^- en γ^- die gebruikt worden bij het vertragen ($V_n(t - \tau_n) > V_n^{voorligger}(t - \tau_n)$). De waarden voor deze parameters zijn terug te vinden in tabel C.11 op pagina 188.

De invloed tijdens het *versnellen* van de parameters α^+ , β^+ en γ^+ op de versnelling wordt weergegeven in figuur 6.2. In de twee bovenste grafieken is duidelijk te zien dat de versnelling afneemt naarmate het voertuig sneller rijdt en de tussenruimte groter wordt. In de onderste grafiek is te zien dat de versnelling lineair

toeneemt met het snelheidsverschil tussen het voertuig en zijn voorligger. In deze grafieken geldt dat de snelheid van het voertuig 90 km/u is, de tussenruimte 20 m bedraagt en het snelheidsverschil 15 km/u.

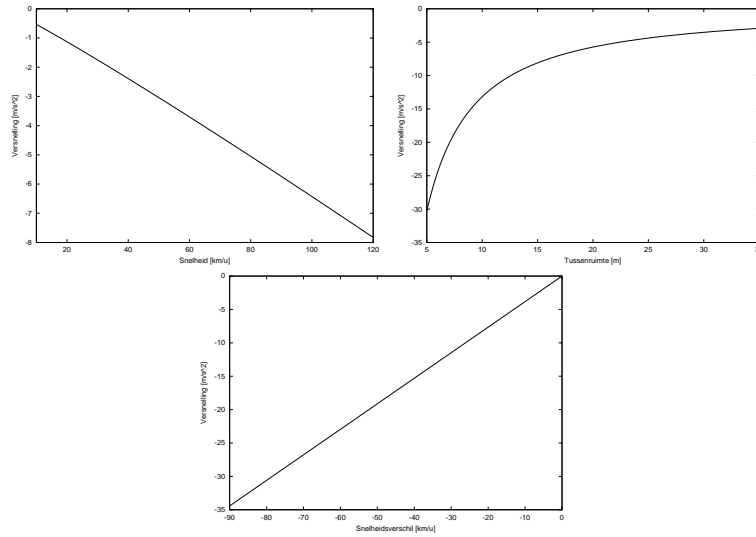


Figuur 6.2: De invloed tijdens het versnellen van de voertuig-volg parameters op de versnelling.

De invloed tijdens het *vertragen* van de parameters α^- , β^- en γ^- op de versnelling wordt weergegeven in figuur 6.3. In de twee bovenste grafieken is duidelijk te zien dat de versnelling (negatief !) afneemt naarmate het voertuig sneller rijdt terwijl ze toeneemt naarmate de tussenruimte groter wordt. In de onderste grafiek is te zien dat de versnelling (negatief !) lineair afneemt met het snelheidsverschil tussen het voertuig en zijn voorligger. In deze grafieken geldt dat de snelheid van het voertuig 90 km/u is, de tussenruimte 20 m bedraagt en het snelheidsverschil -15 km/u.

Merk op dat in vergelijkingen 6.15 en 6.16 gewerkt wordt met tijdstip t in plaats van met tijdstip $(t - \tau_n)$. Dit komt doordat de versnelling in het voertuig-volg regime direct moet worden toegepast. Door mezelf uitgevoerde testen met *Mitrasim 2000* brachten aan het licht dat indien er met tijdstip $(t - \tau_n)$ wordt gewerkt, de voertuigen onrealistisch gedrag vertoonden : ze remden van ruim 100 km/u af naar volledige stilstand op slechts enkele meters, wat onmogelijk is.

Algemeen gezien blijkt dat vergelijkingen 6.15 en 6.16 ervoor zorgen dat het voertuig-volg model *stabiliteit* vertoont, dit wil zeggen dat een voertuig een min of meer constante snelheid probeert aan te houden van zodra het in het voertuig-volg regime terechtkomt (het wordt dan ‘gevangen’ in dit regime).



Figuur 6.3: De invloed tijdens het vertragen van de voertuig-volg parameters op de versnelling.

Het noodtoestand regime

Indien

$$t_{volg}(t - \tau_n) < t_{volg}^{min}, \quad (6.17)$$

dan bevindt het voertuig zich in het noodtoestand regime. Het voertuig zal dan een gepaste vertraging toepassen om botsing met de voorligger te vermijden en de tussenruimte veilig te vergroten. Volgende formules worden gebruikt :

$$a_n(t) = \begin{cases} \min\{a_v^{max-}, a_{n-1}(t - \tau_n) - \frac{(v_n - v_{n-1})^2}{2d_{volg}(t - \tau_n)}\} & \text{als } v_n > v_{n-1} \\ \min\{a_v^{max-}, a_{n-1}(t - \tau_n) + \frac{a_v^{max-}}{4}\} & \text{als } v_n \leq v_{n-1} \end{cases} \quad (6.18)$$

In vergelijking 6.18 is $a_{n-1}(t - \tau_n)$ de versnelling van het voertuig van bestuurder $(n - 1)$, v_n de snelheid van het voertuig van bestuurder n op tijdstip $(t - \tau_n)$ en v_{n-1} de snelheid van het voertuig van bestuurder $(n - 1)$ op tijdstip $(t - \tau_n)$.

De factor $-\frac{(v_n - v_{n-1})^2}{2d_{volg}(t - \tau_n)}$ duidt op de normale remafstand [Yan97].

Uitzonderingen

Naast de drie toestanden in het voertuig-volg model worden volgende uitzonderingen toegepast :

- indien op een zeker tijdstip t de snelheid van een voertuig 0 is of gelijk is aan de gewenste snelheid van de bestuurder dan wordt de versnelling van dat voertuig direct op 0 gezet. De redenen hiervoor zijn dat zo de vorming van door het wegennetwerk propagerende golven van gestopte en juist vertrokken voertuigen mogelijk zijn en dat de voertuigen niet constant fluctueren tussen versnellen en vertragen (wat gebeurt wanneer een bestuurder maar om de τ s zijn versnelling aanpast terwijl de snelheid van het voertuig elke ω s ($= 0,1$ s) wordt berekend).
- Indien een voertuig op een zeker tijdstip t een afstand zal afleggen die groter is dan de huidige tussenruimte dan wordt de snelheid van dit voertuig aangepast om een botsing met de voorligger te vermijden. In MITSIM wordt bijvoorbeeld de ondergrens voor de tussentijd aangepast zodat botsen onmogelijk is. In Mitrasim 2000 echter is deze beperking niet nodig, er wordt onafhankelijk van de tussentijd op botsingen gecontroleerd.

6.3.5 Het vak-verander model

Het vak-verander model wordt in de volgende drie situaties gebruikt :

- om voertuigen in te halen als de bestuurder sneller wil gaan,
- om zich indien mogelijk naar het meest rechtse vak te begeven (dit wordt voorgeschreven door het Belgisch verkeersreglement)
- en om het juiste vak te kiezen bij het volgen van de voor elk voertuig vooraf uitgestippelde reisweg.

Het vak-verander model wordt niet constant gebruikt maar slechts om de τ_n s (dit is de reactietijd van bestuurder n). Uitgaande van de zojuist vermelde situaties kan een vakverandering één van volgende twee vormen aannemen :

- een verplichte vakverandering (MLC)
- en een gewenste vakverandering (DLC).

De eerste soort wordt gebruikt bij het volgen van de reisweg terwijl de tweede soort in de andere twee gevallen wordt gebruikt.

Verplichte vakveranderingen (MLC)

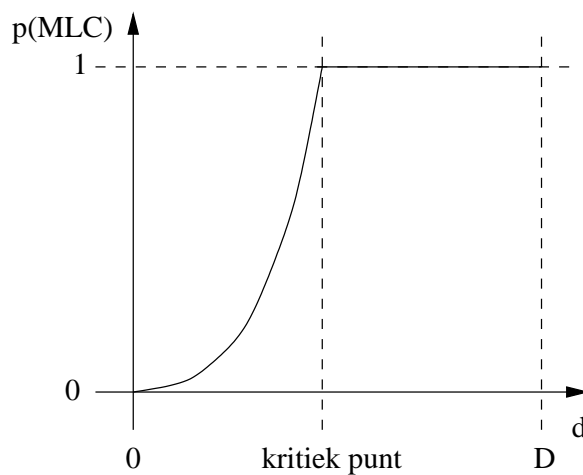
Een verplichte vakverandering wordt overwogen wanneer :

- het voertuig zich op een oprit bevindt
- en wanneer het voertuig zich naar een afrit begeeft.

In het eerste geval streeft het voertuig ernaar de oprit te verlaten en zich op de hoofdbaan te begeven, in het tweede geval streeft het voertuig ernaar zich van de hoofdbaan naar de afrit te verplaatsen.

Bij het overwegen van een MLC wordt er rekening gehouden met de agressie van een bestuurder en het aantal vakveranderingen dat moet uitgevoerd worden om zich naar het gewenste vak te begeven. Hoe agressiever een bestuurder is, hoe later hij van vak zal veranderen. Hoe meer vakveranderingen er dienen uitgevoerd te worden, hoe eerder deze moeten gebeuren. Dit laatste dient om te vermijden dat bestuurders een hele tijd op de hoofdbaan blijven rijden en pas op het allerlaatste moment deze volledig kruisen om bijvoorbeeld een afrit te nemen (wat tot zeer gevaarlijke en onveilige situaties kan leiden).

Figuur 6.4 toont hoe de kans op het uitvoeren van een MLC toeneemt naarmate een voertuig het einde van een oprit/afrit nadert.



Figuur 6.4: De kans op het uitvoeren van een verplichte vakverandering in functie van de afstand afgelegd op een oprit/afrit.

In deze figuur is te zien dat de kans eerst zachtjes toeneemt, vervolgens sneller toeneemt en vanaf een bepaald punt, *het kritieke punt*, zelfs constant wordt. De

eerste twee toenames zijn polynomiaal in functie van de afgelegde afstand op de oprit/afrit terwijl vanaf het kritieke punt de kans altijd 1 is. Bij conservatieve bestuurders zal dit kritieke punt meer naar links liggen, wat als gevolg heeft dat ze veel eerder een verplichte vakverandering zullen overwegen.

Wiskundig kan dit als volgt uitgedrukt worden :

$$p(\text{MLC}, d) = \begin{cases} \left(\frac{d}{k}\right)^n & \text{als } d < k \\ 1 & \text{als } d \geq k \end{cases}, \quad (6.19)$$

met d de afgelegde afstand op de oprit/afrit, D de lengte van de oprit/afrit, k de plaats van het kritieke punt en n de graad van de te gebruiken polynoom. In *Mitrasim 2000* wordt $n = 3$ genomen, het gebruik van een hogere graad heeft als gevolg dat het langer zal duren vooraleer een bestuurder een MLC overweegt. Immers, indien men de rij functies $(f_n)_n$ beschouwt, met

$$f_n : [0, 1] \longrightarrow [0, 1] : x \longrightarrow x^n (\forall n \in \mathbf{N}), \quad (6.20)$$

dan convergeert deze puntsgewijs [Low94] naar de functie

$$f : [0, 1] \longrightarrow [0, 1] : x \longrightarrow \begin{cases} 0 & \text{als } x \in [0, 1[\\ 1 & \text{als } x = 1. \end{cases} \quad (6.21)$$

Dit maakt dat hoe groter n wordt genomen, hoe langer de functiewaarden in de buurt van 0 blijven liggen.

Verder wordt nog gesteld dat indien het aantal te kruisen vakken 2 is, het kritieke punt op half zijn oorspronkelijke waarde zal liggen. Indien het aantal te kruisen vakken meer dan 2 is dan zal het kritieke punt op een kwart van zijn oorspronkelijke waarde liggen.

Gewenste vakveranderingen (DLC)

Een gewenste vakverandering kan enkel uitgevoerd worden indien het voertuig geen verplichte vakveranderingen meer moet uitvoeren op de verbinding waar het op rijdt. Indien een gewenste vakverandering kan uitgevoerd worden dan zijn er twee mogelijkheden : het linkse of rechtse naburige vak. Het naburige vak links wordt beschouwd indien de snelheid van het voertuig te laag is en indien het voertuig ‘gehinderd’ wordt door een voorligger. Een vakverandering naar rechts wordt beschouwd indien de bestuurder niet naar het vak links wil veranderen en indien het voertuig ongehinderd op de rijbaan rijdt. Dit laatste zorgt ervoor dat het

Belgisch verkeersreglement correct wordt toegepast, namelijk elk voertuig streeft ernaar zo uiterst mogelijk rechts op de rijbaan te rijden.

In dit deel van het vak-verander model wordt ook het aspect van middenvakrijders beschouwd. Deze laatste soort bestuurders weigeren naar het meest rechtse vak te gaan.

Verder wordt er bij een mogelijke verandering naar het linkse vak ook gekeken of het voertuig in kwestie een vrachtwagen is en zo ja, of deze de vakovergang mag uitvoeren. Deze test maakt het mogelijk onderzoek te verrichten naar het beperken van het rijbaangebruik door zwaar verkeer.

Uiteraard wordt er bij gewenste vakveranderingen ook gekeken of de vakovergang toegestaan is : dit gebeurt door het beschouwen van de wegmarkeringen waarbij een ononderbroken streep op een verbod duidt en een onderbroken streep op een toestemming duidt.

Uitvoeren van een vakverandering

Het is belangrijk even bij het volgende stil te staan : hoe gebeurt het eigenlijke uitvoeren van een vakverandering ? Het antwoord hierop is eenvoudig : een vakverandering gebeurt altijd in 1 kloktik (ω). Na overleg met Qi Yang en Tomer Toledo (van het MIT) besloot ik om de vakverandering als een zuiver discrete gebeurtenis te modelleren. Het alternatief is om een vakverandering enkele seconden te laten duren, maar dit heeft volgens hen slechts weinig invloed op de verkeersstroom, vandaar dat volgens hen ook veel simulators een vakverandering als een enkele gebeurtenis beschouwen.

Van zodra een bestuurder heeft besloten om een vakverandering uit te voeren wordt een volgende fase in het vak-verander model gestart : het aanvaarden of verwerpen van de tussenruimtes voor en achter het voertuig in kwestie. Deze tussenruimtes worden gevormd door enerzijds het voertuig in kwestie en het voertuig voorop in het nieuwe vak te beschouwen en anderzijds door het voertuig in kwestie en het voertuig achterop in het nieuwe vak te beschouwen.

Indien beide openingen groot genoeg zijn voor de bestuurder dan wordt de vakverandering direct uitgevoerd. Dit houdt in dat er nog twee extra karakteristieken voor bestuurders gedefinieerd worden, namelijk $d_{opening}^{vooraan}$, de minimale grootte van de opening vooraan en $d_{opening}^{achteraan}$, de minimale grootte van de opening achteraan. De basiswaarden voor deze parameters zijn terug te vinden in tabel C.12 op pagina 189.

Indien beide openingen niet groot genoeg zijn en de bestuurder moet een MLC uitvoeren, dan wordt een vakverandering geforceerd : het voertuig dat in het nieuwe

vak achterop rijdt wordt gedwongen af te remmen en het voertuig in kwestie er tussen te laten. Op deze manier kunnen de nodige openingen gecreëerd, wat noodzakelijk is in opgestopt verkeer aangezien er in dat geval slechts zelden voldoende grote openingen voorkomen. In het geval de bestuurder een DLC wou uitvoeren en dit niet mogelijk was, dan dient deze op een later tijdstip nog eens te proberen. Merk op dat het afremmen van het achterliggende voertuig niet garandeert dat de vakverandering kan uitgevoerd worden ; een vakverandering kan slechts uitgevoerd worden indien beide openingen groot genoeg zijn.

6.3.6 De reiswegen van de voertuigen

Elk voertuig in het wegennetwerk van *Mitrasim 2000* krijgt een reisweg toebedeeld wanneer dit voertuig het wegennetwerk betreedt. Deze reiswegen starten aan de rand van het wegennetwerk en worden gevormd door een opsomming van de knooppunten waarlangs de voertuigen dienen te passeren. Al deze informatie wordt in een reiswegtabel bewaard die de voertuigen in *Mitrasim 2000* direct kunnen raadplegen. Op basis van deze reiswegtabel en een specifieke reisweg voor een voertuig wordt bepaald welke op- of afritten dit voertuig dient te nemen.

6.3.7 Het genereren van de voertuigen

Bij de aanvang van een simulatie is het wegennetwerk ‘leeg’ en dient dit opgevuld te worden met de nodige verkeersvolumes. Om dit te bewerkstelligen worden aan de rand van het wegennetwerk bronnen van voertuigen gedefinieerd die met regelmaat voertuigen op de rijbaan zetten. Elk voertuig krijgt een initiële snelheid en start telkens op een ander vak (zodat het verkeer al voldoende gemengd is).

Twee parameters bepalen het gedrag van een voertuig-bron :

- de doorstromingsgraad q
- en de distributiefactor ρ .

De doorstromingsgraad bepaalt hoeveel voertuigen er per uur maximaal gegenereerd moeten worden. De distributiefactor bepaalt op welke manier dit verkeer wordt gegenereerd. Er wordt gekozen tussen voertuigen die vertrekken met een constante tussentijd en voertuigen die vertrekken volgens een Poisson-proces. De distributiefactor bepaalt nu in hoeveel procent van de gevallen de voertuigen moeten vertrekken met constante tussentijden. Hoge waarden voor ρ resulteren in

hoge verkeersvolumes, terwijl lage waarden voor ρ resulteren in lage verkeersvolumes. Bij dit laatste merkt men dan het vormen van ‘golven’, namelijk eerst veel voertuigen, geleidelijk aan minder en minder en vervolgens terug veel voertuigen waarna deze cyclus zich herhaalt. Wiskundig kan dit Poisson-proces als volgt uitgedrukt worden :

$$\text{nieuwe tussentijd} = \text{huidige tussentijd} - \left\lceil \frac{\ln(r)}{q} \cdot 36000 \right\rceil, \quad (6.22)$$

met r een willeurig getal tussen 0 en 1 (r mag niet 0 zijn !) en q de doorstrotingsgraad. De factor 36000 wordt gebruikt om de tussentijd uit te drukken in kloktikken (ω) in plaats van uren.

6.3.8 Conclusies

In dit deel werd uitgebreid ingegaan op het onderliggend wiskundig model van *Mitrasim 2000*. Men dient goed te beseffen dat het hier om een microscopische simulator gaat wat onvermijdelijk als gevolg heeft dat er tal van parameters zijn die moeten gespecificeerd worden. Hierbij aansluitend is het zeer belangrijk te weten welke parameters *wel* en welke parameters *niet* gemeten zijn ! De gemeten parameters zijn :

- de lengtes van de wegen,
- de reactietijden van de bestuurders,
- de procentuele verdeling personenwagens en vrachtwagens (vlootmix)
- en de dimensies van personenwagens en vrachtwagens.

De geschatte parameters :

- de hellingen van de wegen,
- de agressie van de bestuurders (ik acht deze uniform verdeeld),
- het percentage middenvakrijders,
- de parameter ν die bepaalt met welke extra snelheid een bestuurder de snelheidsbeperking overtreedt (deze is overgenomen uit [Ahm99] en lichtjes aangepast),

- de tolerantie λ voor de gewenste snelheid,
- de maximale versnelling, normale vertraging en maximale vertraging (deze zijn overgenomen uit [Yan97] en lichtjes aangepast),
- de parameters t_{volg}^{min} , t_{volg}^{max} en d_{volg}^{min} van het voertuig-volg model,
- de parameters $d_{opening}^{vooraan}$ en $d_{opening}^{achteraan}$ van het vak-verander model
- en de constantes α^\pm , β^\pm en γ^\pm gebruikt in het voertuig-volg model (deze zijn overgenomen uit [Yan97] en lichtjes aangepast).

Deze twee lijstjes tonen duidelijk het grote probleem aan dat optreedt bij microscopische verkeerssimulators, namelijk het vinden van geschikte waarden voor de talrijke parameters die deel uitmaken van het onderliggend wiskundig model.

6.4 Implementatie van de simulator

De simulator – *Mitrasim* – werd object-georiënteerd geconstrueerd op basis van het in paragraaf 6.3 ontwikkelde wiskundig model en de implementatie ervan gebeurde met behulp van Sun's *Java Development Kit* (JDK) versie 1.2.2. In dit deel wordt een toelichting gegeven waarbij vooral aandacht wordt besteed aan het hart van de simulator, namelijk de simulatiecyclus.

6.4.1 Interne voorstellingen

Het wegennetwerk wordt intern voorgesteld als een hash-tabel die geïndexeerd wordt op het identificatienummer van een verbinding. De knooppunten worden eveneens op dergelijke wijze intern voorgesteld. Elke verbinding bezit naast een volledige beschrijving van haar karakteristieken ook nog eens een lijst van voertuigen die ertoe behoren.

Elk voertuig in de simulator heeft, net zoals een verbinding, een verzameling karakteristieken zoals versnellingsvermogens, maximale snelheid et cetera. Elk voertuig heeft daarenboven een bestuurder die ook een verzameling karakteristieken bezit.

Aan de rand van het wegennetwerk liggen twee soorten knooppunten : oorsprongen en bestemmingen. Zoals in paragraaf 6.3.7 reeds werd vermeld, zijn er bronnen die voertuigen genereren. Deze bronnen liggen op oorsprongen en zij worden in de simulator gebruikt om voertuigen op het wegennetwerk te zetten. Op basis

van de bronnen en de reiswegen die eraan gekoppeld zijn, houdt de simulator een reiswegtabel bij die door de voertuigen geraadpleegd kan worden. Op deze manier is geweten naar waar de voertuigen moeten rijden (bijvoorbeeld welke afrit ze dienen te nemen).

De simulator ondersteunt ook de mogelijkheid tot het plaatsen van lusdetectoren (zij worden aan verbindingsknooppunten of bestemmingen geplaatst). Elke lusdetector heeft een zekere meetperiode. Dit komt doordat informatie over doorstromingsgraden, gemiddelde snelheid en dichtheid bepaald wordt gedurende een zeker tijdsinterval (de lengte van dit interval kan voor elke lusdetector apart opgegeven worden). Merk op dat in de simulator alle lusdetectoren *exact* werken, zij introduceren geen meetfouten.

In paragraaf 6.2.1 werd vermeld dat de simulator klok-gedreven is. Dit houdt in dat er een simulatieklok aanwezig is die met discrete stapjes vooruitgaat. Elk stap is één kloktik en komt overeen met 0,1 s.

Belangrijk om weten is dat, omwille van de complexiteit tijdens het simuleren, slechts vier soorten verbindingen door de simulator ondersteund worden :

- tunnels,
- autosnelwegen,
- samengevoegde opritten (links en rechts)
- en gescheiden afritten (links en rechts).

In tabel C.9 op pagina 188 worden de gebruikte waarden van de algemene simulatieparameters gegeven. Merk op dat de simulatie-starttijd louter illustratief is : de simulator gebruikt deze enkel als nulpunt in de tijd.

6.4.2 Het hart van de simulator

Het hart van de simulator wordt, zoals reeds eerder gezegd, gevormd door de simulatiecyclus die elke kloktik wordt doorlopen. Afhankelijk van de snelheid van de computer die de simulator draait kan deze cyclus sneller of trager dan in real-time uitgevoerd worden. Merk op dat het aantal voertuigen in de simulator ook een weerslag heeft op de performantie ervan : hoe meer voertuigen er in het wegennetwerk rondrijden, hoe meer vergelijkingen er dienen te gebeuren (nodig bij het voertuig-volg model en het vak-verander model) waardoor de simulator steeds trager gaat draaien, totdat de maximale capaciteit van het wegennetwerk

bereikt is. Vanaf dit punt blijft de performantie van de simulator min of meer constant.

De simulatiecyclus bestaat uit volgende stappen :

1. genereer voertuigen aan de randen van het wegennetwerk,
2. bereken de versnelling en snelheid van elk voertuig,
3. verplaats alle voertuigen,
4. werk alle lusedetectoren bij
5. en verhoog de simulatieklok met 1 kloktik.

Al deze stappen (behalve de laatste die triviaal is) worden nu concreet toegelicht :

Genereren van voertuigen

Elke bron aan de rand van het wegennetwerk krijgt van de simulator elke kloktik de opdracht om, al naargelang de doorstromingsgraad en distributiefactor, een voertuig te genereren. Indien een bron een voertuig genereert dan wordt aan de hand van de vlootmix bepaald of het een personenwagen of vrachtwagen wordt. Vervolgens wordt er een bestuurder aangemaakt – met specifieke karakteristieken – die met het voertuig verbonden is. Hierna krijgt het voertuig een bepaalde reisweg toegewezen zodat het tenslotte het wegennetwerk betreedt en de reis kan aanvangen.

Berekenen van snelheden en versnellingen

Dit is de meest tijdrovende stap in de simulatiecyclus aangezien hier het voertuigvolg model en het vak-verander model worden gebruikt.

Eerst wordt de gewenste snelheid van de bestuurder vastgesteld. Deze snelheid is immers afhankelijk van de verbinding waar het voertuig zich momenteel op bevindt (zie paragraaf 6.3.2).

Vervolgens wordt het vak-verander model gebruikt om te beslissen of een MLC of DLC dient uitgevoerd te worden. Indien een vakverandering nodig/gewenst is dan worden de voertuigen voorop en achterop gezocht zodat de openingen vooraan en achteraan bepaald kunnen worden. Op basis van deze openingen wordt dan gekeken of het mogelijk is om de vakverandering veilig uit te voeren. Indien dit onmogelijk blijkt en het voertuig moet een MLC uitvoeren dan wordt het

achterliggende voertuig in het nieuwe vak gedwongen af te remmen zodat het voertuig in kwestie de vakverandering na enige tijd – wanneer de openingen groot genoeg zijn – kan uitvoeren.

Tenslotte wordt het voertuig-volg model toegepast. Dit vereist dat het vooropliggend voertuig wordt gezocht waarna de tussenruimte en tussentijd berekend kunnen worden. Op basis van deze gegevens wordt bepaald in welk regime het voertuig zich bevindt waarna de versnelling en snelheid berekend worden.

Merk op dat de voertuigen *niet* in willekeurige volgorde worden behandeld : eerst komen de voertuigen die zich aan het einde van de verbinding bevinden en vervolgens komen de voertuigen die zich aan het begin van de verbinding bevinden. Dit is noodzakelijk omdat de stimulus-respons relaties gebaseerd zijn op de acties van het vooropliggend voertuig, wat daardoor dan ook eerst behandeld moet worden.

Verplaatsen van de voertuigen

Nadat de snelheid van elk voertuig berekend is, wordt de positie ervan hiermee evenredig aangepast. Indien het voertuig het einde van een verbinding bereikt dan wordt in de reiswegtabel gekeken naar waar het voertuig zich dient te verplaatsen (om op de reisweg te blijven). Vervolgens wordt het voertuig volledig overgedragen naar de volgende verbinding. Indien het voertuig een lusdetector passeert dan wordt de informatie van dit voertuig doorgegeven aan de lusdetector, wat het nabootsen van een meting voorstelt.

Nadat alle voertuigen behorende tot één verbinding verplaatst werden, worden al deze voertuigen gesorteerd op basis van hun positie op die verbinding. De huidige manier werkt met een eenvoudige *quicksort*.

Bijwerken van alle lusdetectoren

Indien de meetperiode van een lusdetector verstreken is dan worden gemiddelde snelheid, doorstromingsgraad en dichtheid berekend. De gemiddelde snelheid is het rekenkundige gemiddelde van alle gemeten snelheden gedurende de meetperiode. De doorstromingsgraad is gelijk aan het aantal voertuigen dat de lusdetector passeerde gedurende de meetperiode, gedeeld door het aantal kloktikken dat de meetperiode duurde en vermenigvuldigt met 36000. Deze laatste stap zorgt ervoor dat de doorstromingsgraad wordt uitgedrukt in voertuigen/uur. De dichtheid wordt berekend aan de hand van de fundamentele vergelijking die uitgebreid besproken wordt in appendix B.

6.4.3 Conclusies

Nadat het wiskundig model voorgesteld werd, kwam een bespreking van de simulator die hierop gebaseerd is. Er werd een korte toelichting gegeven bij de interne voorstelling van het wegennetwerk, de voertuigen en de bestuurders die de simulator gebruikt. Vervolgens werd er dieper ingegaan op de essentie van de simulator, namelijk de simulatiecyclus.

6.5 Conclusies

In dit hoofdstuk werd een oplossingsmethode uitgedokterd die moet toelaten om de hypothesen die verderop in deze thesis gepostuleerd worden te testen. Eerst werd gekeken naar welke mogelijke oplossingsmethodes er zijn, dit bleken veldtesten en computersimulaties te zijn. Vervolgens werden enkele gemaakte keuzes toegelicht wat onder andere aanleiding gaf tot het gebruik van een microscopische simulator. Daarna werd een wiskundig model geformuleerd waarop de simulator van *Mitrasim 2000* gebaseerd is. Tot slot werd de implementatie van deze simulator besproken.

Deel III

Empirische methode

Hoofdstuk 7

Gebruik van realistische gegevens

Inleiding

Het bekomen van realistische gegevens – bij een studie gebaseerd op de empirische methode – is een absolute noodzaak om het ‘natte vingerwerk’ tegen te gaan, wat voorkomt wanneer men geen geschikte gegevens voorhanden heeft en dan maar zo goed mogelijk afschat. In dit deel wordt toegelicht welke inspanningen zijn verricht om de noodzakelijke gegevens voor de simulator *Mitrasim 2000* te bekomen. Volgende gegevens worden besproken :

- reactietijden van bestuurders,
- het gebruikte wegennetwerk
- en de doorstromingsgraden.

7.1 Reactietijden

In de literatuur worden er vaak ‘standaardwaarden’ vermeld voor de reactietijd van bestuurders. Ik heb de indruk dat men in veel gevallen de waarden overneemt die in andere werken vermeld worden, soms worden er zelfs geen waarden vermeld en biedt men deze als parameters aan de eindgebruiker aan die er dan maar zijn plan mee moet trekken. Het leek me dan ook gepast om zelfs eens te kijken naar de reactietijd van bestuurders en deze zelf experimenteel vast te stellen.

7.1.1 De tests

De opzet van de tests was zeer eenvoudig :

1. een proefpersoon neemt plaats achter een computer waar rem- en gaspedalen op aangesloten zijn (om het realisme te verhogen is er ook nog een stuur voor de computer geplaatst),
2. op het scherm wordt een (primitief) beeld getoond dat de indruk geeft door de voorruit van het voertuig te kijken, voor de bestuurder is het beeld van een ander voertuig te zien,
3. de proefpersoon duwt met de rechtervoet het gaspedaal in en hoort een toon waarvan de hoogte evenredig is met de druk die op het gaspedaal wordt uitgeoefend,
4. de stoplichten van de voorligger gaan na een willekeurige tijd aan, vanaf dit moment start de chronometer,
5. de proefpersoon dient nu zo snel mogelijk zijn rechtervoet van het gaspedaal te lichten en vervolgens met deze voet het rempedaal volledig in te drukken,
6. de chronometer stopt en de reactietijd wordt weergegeven.

Merk op dat de in de laatste stap gemeten reactietijd eigenlijk de som is van de waarnemingsreactietijd (PRT) en de bewegingstijd (MT) van de voet.

Stappen (3), (4) en (5) worden een aantal keren na elkaar uitgevoerd (dit zijn de verschillende tests). Vermits de proefpersonen maar met één ding bezig zijn, namelijk geconcentreerd kijken naar het beeldscherm, zijn de resultaten van de tests niet volledig zuiver : de bekomen reactietijden zijn waarschijnlijk de beste die mogelijk zijn. Om dit effect tegen te gaan wordt elke proefpersoon onderworpen aan drie reeksen van telkens vijf tests. Gedurende de eerste reeks is de proefpersoon niet afgeleid, gedurende de tweede reeks wordt de proefpersoon afgeleid door hem onverwacht hevig te laten schrikken en gedurende de derde reeks werd er zeer luide muziek gespeeld. Deze extra omgevingscondities verhogen het realisme van de tests.

Het programma dat voor deze tests gebruikt wordt, is *React* en maakt deel uit van *Mitrasim 2000* (zie paragraaf D.7 voor meer informatie).

7.1.2 Resultaten van de proefpersonen

Volgende personen namen deel aan de tests :

- Sanne Engelen,
- Sven Maerivoet,
- Helga Boon,
- Jo Maerivoet
- en Franky Backeljauw.

In paragraaf C.2 zijn tabellen en grafieken opgenomen waar voor elke persoon de gemeten reactietijd van elke test is terug te vinden. Merk op dat er ook foutvlaggen gespecificeerd zijn aangezien de chronometer niet perfect is. De gemeten reactietijden zijn slechts nauwkeurig tot op 0,055 duizendsten van een seconde. Dit komt doordat het programma voor het meten van de tijd gebruik maakt van de 8254 Programmeerbare Interval Tijdgever (PIT op het moederbord van de computer) die per seconde 18,2 interrupts genereert. Op basis van dit aantal interrupts bepaalt de computer het aantal honderdsten van een seconde dat verstreken is. Nu is $1 \text{ s} \div 18,2 = 0,055 \text{ s}$ wat verklaart waarom er niet tot op 1 honderdste nauwkeurig gemeten kan worden maar slechts tot op 0,055 duizendsten van een seconde [Die95].

7.1.3 Verwerking van de resultaten

Veel werken in de literatuur gaan er van uit dat de reactietijden normaal verdeeld zijn. Ik ga echter van een andere veronderstelling uit, namelijk dat de reactietijden lognormaal verdeeld zijn. Dit wil zeggen dat de kans dat een bestuurder een kleinere reactietijd heeft groter is dan de kans dat een bestuurder een grotere reactietijd heeft.

Na het uitvoeren van de tests dient er dus een lognormale verdeling geconstrueerd te worden die in het wiskundig model kan gebruikt worden om reactietijden aan bestuurders toe te kennen. Om een zo realistisch mogelijk beeld te krijgen, heb ik de testresultaten van alle proefpersonen (in totaal zijn dit er N) samen beschouwd. Enerzijds wordt zo een ‘representatief staal’ van de bestuurders voorgesteld en anderzijds worden de diverse situaties mee in rekening gebracht door alle drie de reeksen tests samen te beschouwen.

Het verwerken van de gegevens gebeurt stapsgewijs ; eerst is het nodig dat de bekomen reactietijden logaritmisch getransformeerd worden, waarna het steekproefgemiddelde en de empirische variantie kunnen berekend worden. Stel τ_i zijn de gemeten reactietijden, na logaritmische transformatie krijgen we :

$$\tau_{i,l} = \ln(\tau_i) \text{ met } i \in \{1, \dots, N\}. \quad (7.1)$$

Vervolgens wordt het steekproefgemiddelde van de getransformeerde resultaten berekend :

$$\tau_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{i,l}. \quad (7.2)$$

En de empirische variantie :

$$\tau_{s^2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tau_{i,l} - \tau_m)^2. \quad (7.3)$$

Uit vergelijking 7.3 vinden we de standaardafwijking op triviale wijze :

$$\tau_s = \sqrt{\tau_{s^2}}. \quad (7.4)$$

Grafisch gezien ziet de dichtheidsfunctie van de lognormale verdeling eruit als die van de normale verdeling maar dan asymmetrisch naar links getrokken. De dichtheidsfunctie wordt gegeven door :

$$f(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_s \tau \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\tau) - \tau_m}{\tau_s} \right)^2} & \text{als } \tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max} \\ 0 & \text{als } \tau < \tau_{min} \text{ of } \tau > \tau_{max}. \end{cases} \quad (7.5)$$

Aangezien er geldt dat :

$$\forall \tau : f(\tau) \geq 0, \quad (7.6)$$

en

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) d\tau = 1, \quad (7.7)$$

is vergelijking 7.5 wel degelijk een dichtheidsfunctie [Rou94].

Deze lognormale verdeling is echter vrij complex om ze als RNG direct in een computerprogramma te gebruiken : willekeurige getallen vinden vereist dat we $f(\tau)$ integreren en vervolgens de inverse functie berekenen, wat op zijn minst gezegd omslachtig is. Het kan ook anders : we kunnen op redelijk eenvoudige wijze standaard normaal verdeelde getallen (het gemiddelde is hier 0 en standaardafwijking 1) vinden die we dan kunnen gebruiken om lognormaal verdeelde getallen uit af te leiden. Dit kan doordat de lognormale verdeling eigenlijk een speciale vorm is van de algemene normale verdeling (het gemiddelde is hier m en de standaardafwijking is s), de eerste gebruikt namelijk $X = \ln(Y)$ als stochastiek [Rou94]. Vermits er nu gewerkt wordt met het steekproefgemiddelde en de empirische variantie van de getransformeerde reactietijden, dienen we een inverse tranformatie toe te passen wat dan uiteindelijk de lognormaal verdeelde getallen oplevert :

$$l = e^{sr+m}, \quad (7.8)$$

waarbij l nu een lognormaal verdeeld getal voorstelt, r een normaal verdeeld getal met gemiddelde m en standaardafwijking s . Toegepast op de verdeling van de reactietijden geeft dit :

$$\tau = e^{\tau_s r + \tau_m}, \quad (7.9)$$

waarbij r nu normaal verdeeld is met gemiddelde τ_m en standaardafwijking τ_s die met behulp van vergelijkingen 7.2 en 7.4 berekend worden. Merk op dat deze waarde nog afgekapt moet worden als ze kleiner dan τ_{min} of groter dan τ_{max} zijn.

Als we gebruik maken van de gegevens uit tabel C.2 op pagina 181, dan krijgen we voor $N = 15 \times 5 = 75$:

$$\tau_m = -0,597 \text{ s} \quad (7.10)$$

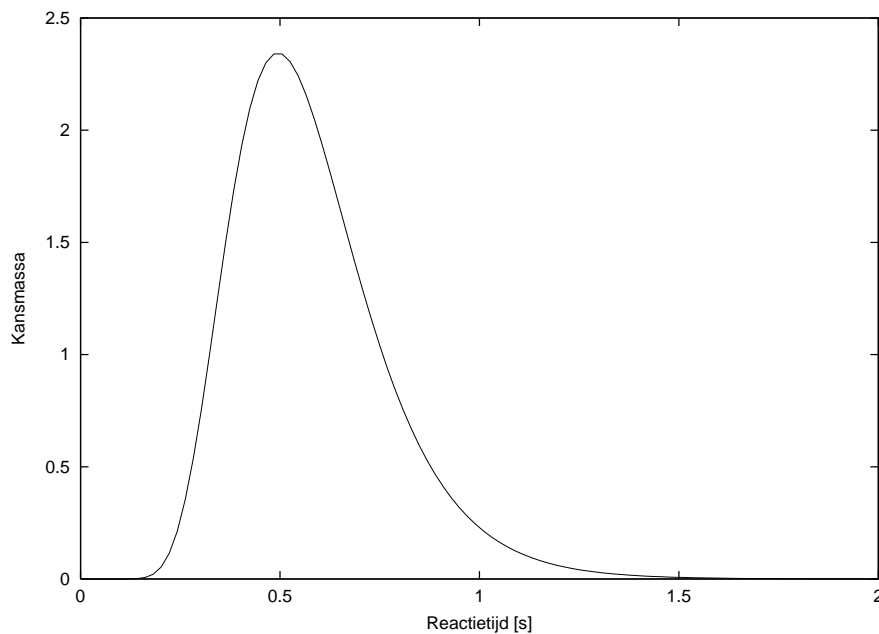
$$\tau_s = 0,326 \text{ s.} \quad (7.11)$$

Verder stel ik dat :

$$\tau_{min} = 0,3 \text{ s} \quad (7.12)$$

$$\tau_{max} = 1,5 \text{ s.} \quad (7.13)$$

Figuur 7.1 geeft de grafiek weer die de dichtheidsfunctie voorstelt ; er is duidelijk te zien dat de kans op een kleinere reactietijd groter is dan de kans op een grotere reactietijd.



Figuur 7.1: De lognormale verdeling van de reactietijden.

Merk op dat de top van deze grafiek op $e^{(\tau_m - \tau_s/2)} = 0,495$ s ligt [Rou94].

7.1.4 Conclusies

In dit deel werd een empirische methode voorgesteld waarmee het mogelijk is de reactietijden van bestuurders te bepalen. Er werd gebruik gemaakt van een computerprogramma, een stuur en pedalen. De gemeten reactietijden werden vervolgens gebruikt om een statistische verdeling op te stellen voor de reactietijden van bestuurders waarna een methode werd gegeven waarmee het mogelijk is op eenvoudige wijze lognormaal verdeelde getallen te genereren. Tenslotte werd deze methode toegepast op de bekomen resultaten wat de lognormale verdeling van de reactietijden opleverde. De hier geschetste methodes tonen aan dat met eenvoudige middelen toch realistische gegevens verzameld kunnen worden.

Belangrijk om weten is dat de hier gevonden waarden *verschillen* van de andere waarden die men meestal in de literatuur terugvindt. Bij deze laatste ligt de gemiddelde reactietijd rond de 1,3 s [Ahm99] terwijl deze bij mij 0,58 s is. Het is evenwel noodzakelijk op te merken dat het hier in de literatuur om reactietijden gaat die meestal bij Amerikaanse bestuurders werden gemeten. Het gebruik van de door mij bekomen lagere reactietijden kan gerechtvaardigd worden door te stellen dat men bij ons in België veel agressiever rijdt in vergelijking met Amerika zodat

onze bestuurders veel alerter moeten zijn. Dit laatste is ook geldig in opgestopt verkeer.

7.2 Het gebruikte wegennetwerk

Zoals in paragraaf 5.2.3 al te zien was, wordt niet de volledige Antwerpse Ring gemodelleerd maar slechts een stuk daarvan. Daarenboven worden ook niet alle op- en afritten beschouwd omdat dit (1) de complexiteit sterk doet toenemen en (2) er geen op maat gesneden voertuigtellingen beschikbaar zijn.

In essentie is een gedetailleerde beschrijving van het wegennetwerk niet nodig aangezien het wiskundig model topologisch steunt op een gerichte graf (zie paragraaf 6.3.1). Niet de posities van de wegen zijn belangrijk maar de lengtes ervan. Om deze te weten te komen dien ik echter het wegennetwerk *wel* in detail te modelleren omdat op basis van deze geometrische beschrijving de lengtes van de wegen worden berekend. Een andere goede reden om het wegennetwerk wel in detail te modelleren is omdat dan een betere visuele verificatie van het systeem verkregen kan worden dan wanneer er uitsluitend topologisch met een gerichte graf wordt gewerkt.

7.2.1 Van waar komen de gegevens ?

Er komen verschillende bronnen in aanmerking : landkaarten, wegenkaarten, directe observaties, lucht- en satellietfoto's, ... Ik heb gekozen voor de laatste bron van informatie : de satellietfoto's in kwestie komen van Microsoft's TerraServer die via het Internet bereikbaar is. De foto's dateren van 1992 en zijn redelijk gedetailleerd : er kan gewerkt worden tot op ongeveer 2 m exact.

Eens het geografisch gebied in kwestie gevonden was, kon ik alle satellietfoto's combineren in één enkel groot beeld, wat me een goed overzicht verschafte op de situatie (de op deze manier bekomen 'monsterfoto' (grijswaarden) bestaat uit ruim 25 miljoen pixels).

7.2.2 Hoe worden deze gegevens verwerkt ?

Mitrasim 2000 bevat een programma dat toelaat een foto als achtergrond te gebruiken en daar dan knooppunten en wegen op te definiëren. Op deze manier werd de monsterfoto in gepaste stukken geknipt die dan elk op hun beurt verwerkt werden : het stuk foto werd in *Network Modeler* geladen, er werd een oorsprong

en schaal gedefinieerd en het wegennetwerk gemodelleerd. Dit laatste ging vrij moeizaam aangezien er geen enkele fout mag gemaakt worden en er op een redelijk gedetailleerd niveau wordt gewerkt. Extra informatie werd bekomen met wegenkaarten en een persoonlijke observatie van bepaalde stukken in het wegennetwerk, namelijk heel het te bestuderen stuk van de Antwerpse Ring met de auto afrijden en opschrijven waar de hellingen juist liggen, waar de toppen liggen, welke snelheidsbeperkingen er overal gelden en wat de toegestane vakovergangen zijn (dit zijn de wegmarkeringen).

Deze laatste stap *is* nodig omdat satellietfoto's en wegenkaarten geen diepte-informatie verschaffen, het zijn immers twee dimensionale beelden. Vandaar dat er enig veldwerk bij kwam kijken om ook deze informatie te bekomen. De noodzakelijkheid ervan komt voort uit het feit dat de in het wiskundig model gebruikte versnelling afhankelijk is van de helling van het stuk rijbaan (zie paragraaf 6.3.3), wat op zijn beurt dan weer aanleiding geeft tot het zogenaamde tunneleffect (zie paragraaf 6.2.3).

7.2.3 Conclusies

De constructie van het wegennetwerk geschiedde aan de hand van satellietfoto's die van het Internet gehaald zijn en een persoonlijke observatie van de ligging van de wegen (hoogtes). Het aldus bekomen wegennetwerk telt :

- 988 knooppunten waarvan 855 gebruikt door omgevingselementen, 6 door oorsprongen, 6 door bestemmingen, 31 door verbindingen tussen wegen en 90 door bochten die de geometrische vorm van het wegennetwerk vormen,
- 43 verbindingen/rijbanen, waarvan 6 opritten, 6 afritten, 6 randen aan het netwerk, 2 tunnelkokers en 29 gewone autosnelwegen
- en 96 omgevingselementen waarvan 48 spoorwegen en 48 veelhoeken (zoals woonzones, Schelde en dokken).

De totale omgeving omvat een oppervlakte van ruim 238 km².

7.3 Doorstromingsgraden

Doorstromingsgraden zijn belangrijk aangezien zij weergeven hoeveel voertuigen er zich op een bepaalde plaats op een bepaald tijdstip in het wegennetwerk bevinden. Ook in *Mitrasim 2000* worden deze gebruikt. Enerzijds bij het specificeren van

de voertuig-bronnen aan de rand van het netwerk en anderzijds bij de metingen die de lusedetectoren verrichten.

7.3.1 Van waar komen de gegevens ?

Voor de gegevens ben ik te rade gegaan bij twee bronnen van informatie :

- de Rijkswacht Verkeerspolitie (te Antwerpen)
- en het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (te Wilrijk).

De metingen worden verricht door lusedetectoren in en camera's langs het wegdek, deze komen vervolgens binnen bij het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap die ze dan doorstuurt naar de Rijkswacht.

Bij de Rijkswacht werd me in detail uitgelegd welke gegevens er juist bekomen worden en wat er allemaal kan gedaan worden. De gegevens die ze binnenkrijgen zijn :

- doorstromingsgraden,
- gemiddelde snelheden
- en bezetting.

Dit alles wordt door computers beheerd en de voertuigtellingen van een dag worden gedurende twee weken bijgehouden. De Rijkswacht heeft ook de mogelijkheid om aan verkeerszorg te doen, zij kunnen namelijk de signalisatie op een bepaalde plaats veranderen door enkele klikken met een muisknop te verrichten. Natuurlijk dienen zij ook een afvaardiging naar de plaats in kwestie te sturen om extra veiligheidsmaatregelen te treffen (cfr. de voorbereidingen bij het afsluiten van een koker van de Kennedytunnel, het opruimen van de brokstukken na een ongeval, ...). Daarnaast beschikt men ook nog eens over een uitgebreide monitor-muur waarop de beelden die de camera's oppikken kunnen weergegeven worden.

Zelf ben ik aan voertuigtellingen geraakt dankzij het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. Daarenboven ben ik zelf ook nog eens achter het computerscherm bij de Rijkswacht gaan zitten om enkele extra tellingen te vergaren. Bij dit laatste moet wel vermeld worden dat er die dag een aantal lusedetectoren defect waren zodat ik genoodzaakt was om gegevens van een week eerder te gebruiken (namelijk maandag 15 mei 2000).

7.3.2 Een waarschuwend woordje

Eens de gegevens in mijn bezit waren, was het eerste dat ik deed een grafiek opstellen van het aantal personenwagens en vrachtwagens gedurende de piekuren (rond 8 uur 's morgens). Echter, het beeld dat ik te zien kreeg was helemaal niet wat ik verwachtte : in de piekperiodes werden ruim duizenden vrachtwagens geteld, maar slechts enkele honderden personenwagens.

Na een gesprek met mensen van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap werd de oorzaak van deze abnormaliteit al snel duidelijk : de lusedetectoren zijn geen optimale meettoestellen. Dit manifesteert zich in het feit dat personenwagens die kort op elkaar rijden door de lusedetector niet van elkaar onderscheiden kunnen worden zodat ze als één vrachtwagen worden geteld.

Hetzelfde geldt voor de camera's die contrastverschillen tussen de voertuigen en het wegdek gebruiken om voertuigtellingen te verrichten. Men liet mij zelfs een beeld zien van een camera die in de Craeybeckstunnel stond opgesteld en waarvan de beelden door een computerprogramma werden verwerkt. Het resultaat was dat voertuigen dubbel werden geteld of zelfs niet werden geteld.

Ik dacht er dan aan om een formule te vinden die uit de gemeten doorstromingsgraad het aantal personenwagens en vrachtwagens zou kunnen afleiden. Op het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap vertelde men me echter dat er geen regelmaat te ontdekken viel in de verkeerdelijke tellingen, waardoor het zoeken naar zo'n formule uiteindelijk op niets zou uitdraaien. Sterker nog, de voertuigtellingen die 's nachts worden opgemeten kunnen totaal verkeerd zijn, wat leidt tot absurde waarden voor de gemiddelde snelheid en dergelijke.

Een ander belangrijk probleem is dat er niet op alle plaatsen lusedetectoren liggen waardoor er niet genoeg metingen beschikbaar zijn. Zo liggen er bijvoorbeeld geen lussen op de verbindingen tussen R1 en E34.

7.3.3 Hoe worden de gegevens verwerkt ?

Uiteindelijk heb ik me gebaseerd op de metingen die ik zelf bij de Rijkswacht heb verricht. Nadat ik het wegennetwerk in *Mitrasim 2000* had gemodelleerd diende ik voor 6 bronnen de doorstromingsgraad te specificeren (alsmede de van daaruit vertrekkende reiswegen). Ik kwam tot volgende resultaten voor de voertuig-bronnen :

- het verkeer komende van E17, richting Antwerpen : 4500 voertuigen/uur,
- het verkeer komende van E34 : 1500 voertuigen/uur,

- het verkeer komende van Linkeroever : 1000 voertuigen/uur,
- het verkeer komende van A12 : 3000 voertuigen/uur,
- het verkeer komende van E19 : 500 voertuigen/uur
- en het verkeer komende van Wommelgem : 5000 voertuigen/uur.

Vervolgens trachtte ik de reismogelijkheden van de voertuigen te bepalen. Deze zijn echter niet afleidbaar uit de beschikbare doorstromingsgraden en kunnen het best bepaald worden door aan elke bestuurder te vragen waarnaar hij reist of door een groot aantal voertuigen individueel te volgen (met een auto of helikopter) om op die manier de reismogelijkheden vast te stellen. Ik kon echter deze veldtesten niet uitvoeren waardoor ik besloot om vanuit elke bron een reismogelijkheid naar elke *bereikbare* bestemming uit te stippelen. Bij elke bron geldt dan nog eens dat elke reismogelijkheid evenveel kans heeft om door een voertuig gevolgd te worden.

Tot slot ben ik zelf ook de vlootmix gaan bepalen door tellingen te verrichten bovenaan de ingang te Linkeroever van de koker van de Kennedytunnel. Ik telde 164 personenwagens en 73 vrachtwagens wat een totaal van 237 voertuigen bepaalt. De vlootmix is dus :

- 69% personenwagens
- en 31% vrachtwagens.

Ik heb ervoor geopteerd om deze vlootmix bij alle 6 de voertuig-bronnen te gebruiken.

7.3.4 Conclusies

Nadat ik de Rijkswacht en het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap had gecontacteerd, kwam ik al snel tot de vaststelling dat de voertuigtellingen helemaal niet accuraat zijn. De enigste oplossing hiervoor is met de hand de tellingen uit te voeren maar dat is niet altijd mogelijk. Vandaar dat ik maar zelf metingen met de apparatuur van de Rijkswacht ben gaan bestuderen om alsnog tot een plausibel resultaat te komen. Het betreft hier metingen verricht op maandag 15 mei 2000 rond 8 uur 's morgens. Belangrijk om te vermelden is dat deze metingen onderschat zijn aangezien er soms pieken tot 6000 of 7000 voertuigen/uur zijn.

De verrichte metingen werden vervolgens in Mitrasim 2000 gebruikt om de voertuig-bronnen realistische verkeersvolumes te laten genereren. Tenslotte werd de vlootmix eigenhandig bepaald aangezien deze niet af te leiden valt uit de resultaten van de meetapparatuur.

7.4 Conclusies

In dit hoofdstuk werd gekeken naar de verschillende soorten meetgegevens die nodig zijn voor *Mitrasim 2000*. Eerst werden de reactietijden onder de loep genomen, vervolgens werd het wegennetwerk beschouwd en tenslotte werden de voertuigtellingen gebruikt als doorstromingsgraden en werden de reismwegen van de voertuigen uitgestippeld.

Belangrijk om te onthouden is dat de door mij gevonden reactietijden beduidend lager liggen dan die in de literatuur vermeld (dit komt doordat de metingen werden verricht met zeer geconcentreerde bestuurders in een zeer eenvoudige omgevingssituatie) en dat de voertuigtellingen zeer foutgevoelig zijn wat ze zo goed als waardeloos maakt.

Hoofdstuk 8

Validatie van het gebruikte model

Inleiding

In dit hoofdstuk wordt nagegaan of *Mitrasim 2000* wel beantwoordt aan de realiteit. Eerst wordt kort geschetst welke programmeerfouten gemaakt werden en hoe deze geëlimineerd konden worden. Vervolgens is er de validatie van de simulator, namelijk het nakijken of het natuurlijke gedrag in de realiteit ook wordt nagebootst door de simulator. Daarna wordt er gekeken of het mogelijk is de simulator te kalibreren zodat deze beter overeenkomt met de werkelijkheid en tenslotte wordt een referentie-experiment uitgevoerd dat als basis voor vergelijking met andere experimenten kan dienen.

8.1 Programmeerfouten

Een belangrijke zorg zijn de programmeerfouten die voorzichtig aangepakt moeten worden. *Mitrasim 2000* bestaat uit ruim 25000 lijnen code en de aanwezigheid van fouten is dan zeker niet vreemd, temeer daar al deze code door slechts één persoon geschreven werd in een periode van ongeveer negen maanden.

Zoals in het citaat aan het begin van deze thesis reeds te lezen valt, is onbedachtzaam knippen en plakken een bron van veel kwaad. Meer dan de helft van de programmeerfouten in *Mitrasim 2000* werden geïntroduceerd door het knippen en plakken van stukjes code waarbij al eens iets over het hoofd werd gezien. De prijs die daarvoor betaald wordt, is zeer duur : in sommige gevallen had ik een drietal dagen nodig vooraleer een fout gevonden en opgelost was.

De andere helft van de programmeerfouten werd gevormd door onlogische constructies die het gevolg waren van mijn eigen onoplettendheid. Zo heb ik bijvoorbeeld een week lang gezocht naar het merkwaardige gedrag van voertuigen die zeer sterk afremden en zeer snel optrokken. Uiteindelijk bleek dat ik de omzetting van km/u naar m/s vergeten was. . .

De ontwikkeling van de simulator was geen triviale zaak : ik werkte wel met een wiskundig model dat logisch klopte, maar de implementatie daarvan verliep moeizaam. Een belangrijke oorzaak is dat de simulator geen grafische uitvoer geeft wat het volgen van het simulatieproces redelijk moeilijk maakt. De simulator kan wel in tandem gestart worden met een programma dat beelden genereert, maar beide programma's werken asynchroon van elkaar wat dan weer de foutopsporing bemoeilijkt. Dit is een groot nadeel aan het gedistribueerd programmeren.

8.2 Validatie van de simulator

Een belangrijke maatstaf is de mate waarin de simulator de realiteit benadert. Om dit te toetsen ontwikkelde ik een klein test-netwerk waarin een klein aantal voertuigen reden. Het wegennetwerk bestond uit vier verbindingen : één autosnelweg, gevolgd door een gescheiden afrit van waaruit twee autosnelwegen de rand van dit wegennetwerk vormden. De totale lengte bedroeg ongeveer twee kilometer. Er was één bron aanwezig van waaruit twee reisen vertrokken.

Het aantal voertuigen in de simulator schommelde tussen de 30 en de 120, al naargelang de bron een lagere of hogere doorstromingsgraad had.

Op deze manier kon ik het overzicht behouden op de talrijke complexe operaties die de simulator elke tijdsstap moet verrichten. In dit deel wordt ingegaan op diverse verschillende fenomenen die in werkelijkheid voorkomen en waarvan wordt nagekeken of deze ook optreden in de simulator.

Merk op dat validatie *fundamenteel verschilt* van kalibratie : bij validatie wordt algemeen natuurlijk gedrag gecontroleerd terwijl bij kalibratie wordt nagekeken hoe dicht dit gedrag aanleunt bij een specifieke realistische situatie. Anders geformuleerd : de validatie zal nakijken in welke mate bijvoorbeeld het gedrag van bestuurders wordt nagebootst terwijl kalibratie zal nakijken of een simulatie overeenkomt met een werkelijke situatie (door bijvoorbeeld voertuigtellingen van beiden te vergelijken). Validatie is dus een *kwalitatief* onderzoek terwijl kalibratie een *kwantitatief* onderzoek is.

8.2.1 Respecteren van de volgfstand

Dit fenomeen wordt nagebootst door het voertuig-volg model. Belangrijk hierin is dat de voertuigen met realistische snelheden in het wegennetwerk rondrijden en dat ze op realistische wijze versnellen en vertragen. De situatie wordt nog extra bemoeilijkt door het feit dat in opgestopt verkeer voertuigen stil kunnen staan en na verloop van tijd weer vertrekken.

Om al deze zaken te valideren werd het vak-verander model uitgeschakeld zodat alle voertuigen in één rechte lijn achter elkaar aanreden. De snelheid van deze ‘trein van voertuigen’ wordt dan bepaald door de snelheid van het vooroprijdende voertuig. Om dit te bewerkstelligen veranderde ik de bron kunstmatig zodat deze één voertuig met een vaste snelheid op de rijbaan zette waarna andere voertuigen met variabele snelheid volgden. Deze manier van werken maakte het me mogelijk om de eigenschappen van dit eerste voertuig te veranderen zodat ik de invloed van deze wijzigingen op de rest van de voertuigen direct kon waarnemen.

Diverse experimenten werden gedaan. Enkelen daarvan lieten het voorste voertuig een tijdje rijden, dit vervolgens plots stoppen en na verloop van tijd weer vertrekken. Het effect was dat een golf van stoppende en terug vertrekkende voertuigen kon waargenomen worden. Meer nog, hoe langer de ‘trein van voertuigen’, hoe meer zones ontstonden waar voertuigen stopten en terug vertrokken. Dit *harmonica-effect* kwam zeer goed overeen met het gedrag dat men observeert in een realistische verkeersstroom.

Andere experimenten lieten enkele welbepaalde voertuigen hun snelheid constant variëren zodat ik de gevolgen daarvan kon zien op de achterliggers. Het resultaat was dat deze achterliggers hun snelheden proper aanpasten aan de vooropliggende voertuigen. Op deze manier konden ook programmeerfouten uit het voertuig-volg model gehaald worden.

Een laatste soort experimenten had te maken met de agressie van bestuurders en de mate waarin dit effect op hun snelheid en volgfstand had. Het bleek dat dit gedrag nauw aansluit bij realistische situaties : er viel waar te nemen dat agressieve bestuurders soms zeer kort op hun voorligger naderden alvorens hun snelheid aan te passen, terwijl conservatieve bestuurders al snel onder invloed raakten van hun voorligger.

8.2.2 De logica bij het van vak veranderen

Eens het voertuig-volg model op punt stond, kon het vak-verander model beschouwd worden. Belangrijk hierbij was dat voertuigen van vak veranderden om

een verplichte vakverandering (MLC) uit te voeren en dat zij dit op het juiste moment deden. Experimenten werden uitgevoerd waarbij de agressie van bestuurders varieerde zodat het effect kon waargenomen worden op het nemen van de beslissing om een MLC uit te voeren.

Langs de andere kant onderzocht ik het effect dat vrijwillige vakveranderingen (DLC) op de verkeersstroom hadden. Het resultaat was – net zoals in werkelijkheid – dat men op het uiterst linkse vak meestal een hogere gemiddelde snelheid waarneemt dan in de andere vakken. Merk op dat dit fenomeen niet meer noodzakelijk waar is in opgestopt verkeer. Hier meet men dan ongeveer dezelfde gemiddelde snelheid in alle vakken.

8.2.3 Het tunneleffect

Een belangrijke indicatie van het gebruik van de correcte versnellingen manifesteert zich in het tunneleffect. Dit werd nagekeken door de hellingen van de autosnelwegen drastisch aan te passen en te kijken naar het effect dat dit had op de voertuigen. Ik mat een lagere gemiddelde snelheid boven op een helling dan beneden aan de helling. Hetzelfde werd waargenomen bij tunnels die nagebootst worden door een bepaald stuk autosnelweg lager dan de andere stukken te plaatsen.

8.2.4 Conclusies

De validatie van de simulator was noodzakelijk om te kunnen verifiëren of deze zich wel naar de werkelijkheid gedraagt. Belangrijke fouten werden op deze manier ook ontdekt en verholpen. Merk op dat validatie een proces is dat tijdens de ontwikkeling van de simulator gebeurt, er werden immers in de programmacode talrijke constructies gebouwd die telkens zeer specifieke taken hadden. Het uiteindelijke doel van deze stukjes programmacode was om kunstmatige testen uit te voeren waarna eventuele fouten werden geëlimineerd (vanaf dit punt werden de stukjes programmacode uit de simulator verwijderd aangezien ze niet meer nodig waren).

8.3 Kalibratie van de simulator

De kalibratie van de simulator hield zich bezig met het vinden van geschikte waarden voor de talrijke parameters die er deel van uitmaken. Dit proces geschiedde *na* constructie van de simulator (dus na de validatie ervan). Het bleek echter geen

sinecure te zijn om de juiste waarden te vinden die horen bij de diverse parameters. De hoofdreden hiervoor is dat ik niet genoeg informatie heb om deze parameters nog maar te schatten. Voor de meeste zaken behielp ik mij met hetgeen ik in de literatuur vond. Zoals in paragraaf 6.3.8 werd vermeld, kon ik langs de ene kant wel de reactietijden bepalen maar langs de andere kant tastte ik dan weer in het duister wat betreft de parameters voor het voertuig-volg model en het vak-verander model.

In tabellen C.9, C.10, C.11 en C.12 (terug te vinden vanaf pagina 188) staan de uiteindelijke waarden die ik gebruikte voor de diverse parameters.

Een andere belangrijke component van het kalibratieproces is het gebruik van de voertuigtellingen : normaal gezien meet men de doorstromingsgraden op bepaalde plaatsen in het echte wegennetwerk waarna men ditzelfde wegennetwerk simuleert en probeert te achterhalen hoe groot de fout is die tijdens het simuleren wordt gemaakt. Dit kan gebeuren door bijvoorbeeld een rechtstreekse vergelijking van de doorstromingsgraden. Spijtig genoeg zijn de voertuigtellingen allesbehalve accuraat, wat ze dan ook zo goed als nutteloos maakt. Vandaar dat het mij niet gepast leek om deze als basis voor vergelijking bij de kalibratie te gebruiken. Dezelfde redenering gaat ook op voor de gemiddelde snelheid en de dichtheid.

8.4 Uitvoeren van het referentie-experiment

Aangezien er uitspraken over de diverse hypothesen – die in het volgende hoofdstuk uitgebreid toegelicht worden – gedaan zullen worden, is het nodig een basis voor referentie te hebben. Hiervoor werd een experiment uitgevoerd waarbij voor alle parameters standaardwaarden gebruikt werden. In de experimenten die de hypothesen vergezellen wordt dan telkens één parameter veranderd.

In dit deel wordt de standaardwaarden van de parameters toegelicht en de resultaten van het experiment kort besproken.

8.4.1 Standaardwaarden voor de parameters

Alle parameters krijgen een standaardwaarde toebedeeld. Bijna al deze waarden zijn opgenomen in tabellen C.9, C.10, C.11 en C.12 (terug te vinden vanaf pagina 188).

Buiten deze parameters zijn er nog twee andere :

- het percentage middenvakrijders bedraagt 30%

- en vrachtwagens mogen enkel op de twee uiterst rechtse vakken rijden.

Ook wat het gebruikte wegennetwerk betreft zijn er enkele basisveronderstellingen : de maximum toegelaten snelheid op de Antwerpse Ring bedraagt 100 km/u. Er liggen drie vakken en er zijn geen beperkingen wat de vakovergangen betreft¹. Alle bronnen werkten met een distributiefactor van 0,85 bij het genereren van voertuigen, wat betekent dat 85% procent van het gegenereerde verkeer vertrekt met een constante tussentijd terwijl de rest van het verkeer vertrekt volgens een Poisson-distributie (zie paragraaf 6.3.7 voor meer informatie hieromtrent).

Er worden ook nog eens vier lusdetectoren gebruikt om informatie over de voertuigen te vergaren. Deze zijn gelegen aan de twee ingangen en de twee uitgangen van de Kennedytunnel.

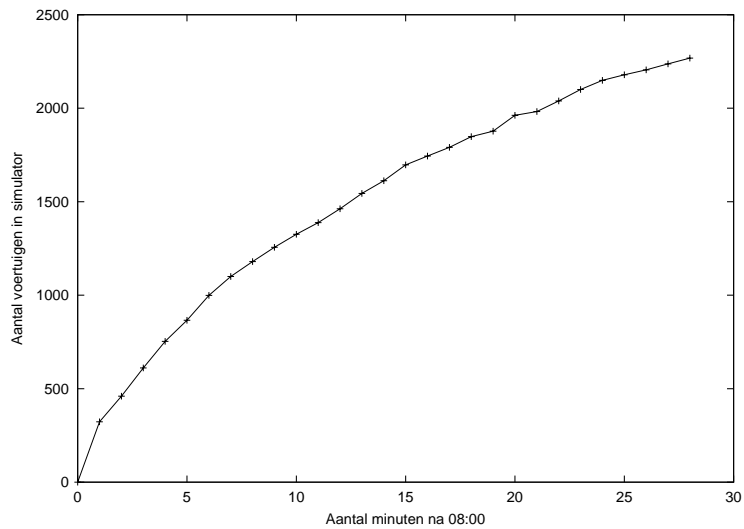
8.4.2 Resultaten van het experiment

Het experiment werd uitgevoerd met een Intel Pentium III 667 MHz processor en 128 Mb RAM-geheugen en duurde drie uur. Er waren maximaal 2269 voertuigen in de simulator aanwezig. De totaal gesimuleerde tijd bedroeg ongeveer 28 minuten, wat maakt dat de simulator slechts aan een vijftien procent van real-time werkt.

Het bleek echter dat de simulator sterk vertraagde vanaf het moment dat er een vijfhonderdtal voertuigen aanwezig waren. Dit komt doordat er steeds meer complexe bewerkingen uitgevoerd moeten worden om al deze voertuigen in goede banen te leiden. De grafiek in figuur 8.1 toont zeer goed aan dat hoe langer de simulator draait, hoe minder snel er voertuigen bijkomen. Er is een duidelijk logaritmisch verloop te zien.

Belangrijk is om eens te kijken naar de empirische stroommodellen (zie paragraaf 2.2 voor meer informatie omtrent deze modellen). Van de vier lusdetectoren wordt er slechts één beschouwd, namelijk deze gelegen aan de ingang van de Kennedytunnel (Antwerpen), de andere lusdetectoren hebben analoge gegevens. Bij elke grafiek wordt ook een gepaste benadering gegeven (met behulp van de methode van de kleinste kwadraten).

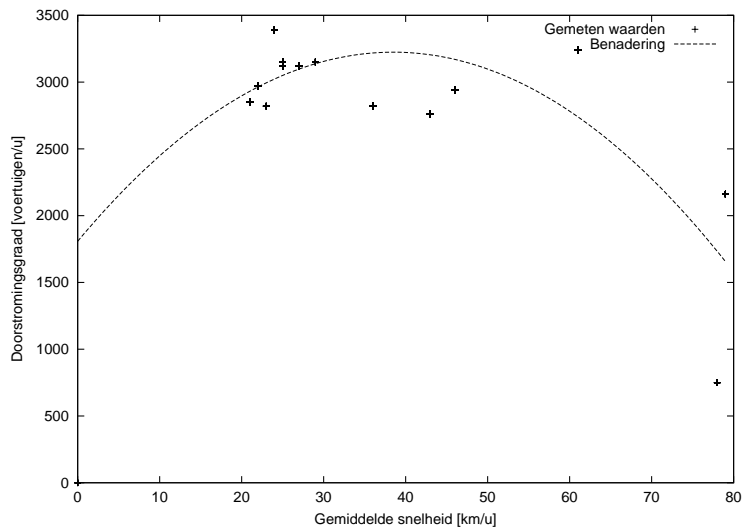
¹Een uitzondering hierop wordt gevormd door de wegmarkeringen die men aantreft bij het naderen van de Kennedytunnel aan de kant van Linkeroever, deze zijn sinds ongeveer een half jaar veranderd en ik beschouw ze dan ook als standaard.



Figuur 8.1: Het aantal voertuigen neemt steeds minder snel toe naarmate de simulator langer draait.

Snelheid-doorstromingsgraad model

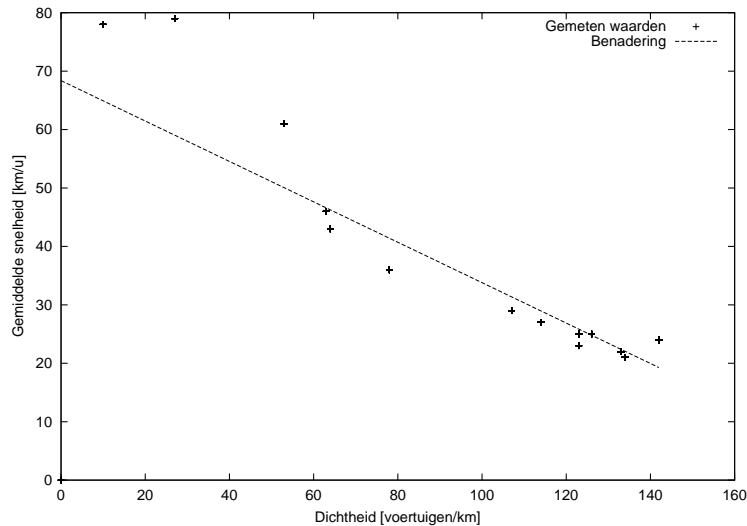
In de grafiek in figuur 8.2 wordt voor elke doorstromingsgraad de overeenkomende snelheid getoond. Veel datapunten liggen bovenaan, wat een indicatie is van opgestopt verkeer (zie paragraaf 2.2.1 voor meer informatie omtrent de parabool).



Figuur 8.2: De snelheid-doorstromingsgraad grafiek van het referentie-experiment.

Snelheid-dichtheid model

In figuur 8.3 is te zien dat de punten op een dalende lijn liggen, wat overeenkomt met het empirische model besproken in paragraaf 2.2.2. Men kan zien dat bij een toenemende dichtheid de gemiddelde snelheid daalt.



Figuur 8.3: De dichtheid-snelheid grafiek van het referentie-experiment.

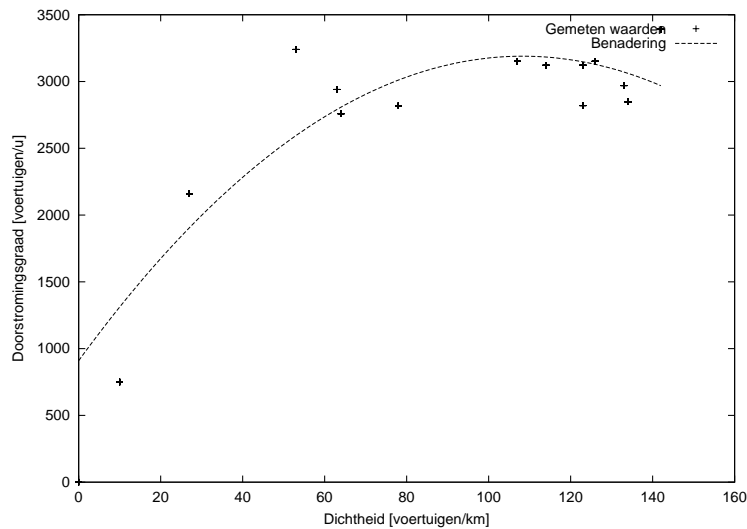
Doorstromingsgraad-concentratie model

In figuur 8.4 is te zien dat veel datapunten bovenaan liggen, dit is op de top van de parabool (zie figuur 2.6 op pagina 33 voor meer informatie hieromtrent).

Merk op dat concentratie hier wordt opgevat als dichtheid.

8.4.3 Conclusies

In dit deel werd het referentie-experiment besproken dat als basis zal dienen voor de experimenten die bij de verschillende hypothesen horen. Eerst werden de verschillende basisveronderstellingen toegelicht waarna de resultaten kort werden besproken. Aan de grafiek van de resultaten te zien, leunen deze aan bij de te verwachten empirische grafieken die in het hoofdstuk over verkeersstromen werden besproken. Het feit dat de grafieken geproduceerd door de simulator zo goed overeenkomen met de empirische tegenhangers, draagt bij tot het feit dat deze simulator wel degelijk kan dienen voor vergelijkingen met realistische situaties.



Figuur 8.4: De dichtheid-doorstromingsgraad grafiek van het referentie-experiment.

8.5 Conclusies

In dit hoofdstuk werd gekeken naar het realisme dat *Mitrasim 2000* vertoont. Eerst werden allerlei fouten gecorrigeerd, vervolgens werd gekeken of de simulator het algemene natuurlijke gedrag van bestuurders en voertuigen nabootst waarna een poging tot kalibratie werd beschreven. Bij dit laatste proces werd vastgesteld dat het geen eenvoudige opdracht is om dit tot een goed einde te brengen zodat er in de mate van het mogelijke schattingen gebruikt worden die gebaseerd zijn op waarden die in de literatuur worden aangetroffen. Tot slot werd een referentie-experiment beschreven dat als basis voor vergelijking met andere experimenten zal dienen.

Gewapend met deze kennis kan het volgende hoofdstuk aangesneden worden dat de diverse hypothesen beschrijft en bespreekt aan de hand van geschikte uitgevoerde experimenten.

Hoofdstuk 9

Hypotheses, experimenten en evaluaties

Inleiding

In dit hoofdstuk worden enkele hypotheses aan de hand van experimenten getest. Voor het uitvoeren van deze experimenten wordt gebruik gemaakt van *Mitrasim 2000*. Alle hypotheses worden apart getest zodat duidelijk de invloed van een verandering van slechts één parameter zichtbaar wordt. Volgende vijf hypotheses worden besproken :

- het veranderen van de snelheidsbeperking,
- het opleggen van een inhaalverbod,
- beperkingen op het baangebruik door zwaar verkeer,
- de invloed van middenvakrijders
- en het gebruiken van een extra vak.

Van elke hypotheses wordt een korte beschrijving gegeven, vervolgens wordt de opzet en uitvoer van de experimenten besproken en tenslotte volgt een bespreking van de resultaten.

9.1 Uitvoeren van de experimenten

Alle experimenten werden uitgevoerd met een Intel Pentium III 667 MHz processor en 128 Mb RAM-geheugen. Er werd gebruik gemaakt van Sun's *Java Development Kit* JDK versie 1.2.2. Elk experiment nam ongeveer drie uur in beslag, dit kwam overeen met ruim 20 minuten gesimuleerde tijd. De gegevens werden door de lusdetectoren elke twee minuten berekend.

Volgende 4 lusdetectoren worden gebruikt :

LD1 : gelegen aan de ingang van de Kennedytunnel te Antwerpen,

LD2 : gelegen aan de uitgang van de Kennedytunnel te Linkeroever,

LD3 : gelegen aan de ingang van de Kennedytunnel te Linkeroever en

LD4 : gelegen aan de uitgang van de Kennedytunnel te Antwerpen.

Bij de experimenten worden niet alle lusdetectoren in acht genomen. Bij de eerste, derde en vijfde hypothese worden LD1 en LD2 beschouwd, bij de tweede en vierde hypothese worden LD3 en LD4 beschouwd.

9.2 Het veranderen van de snelheidsbeperking

9.2.1 Korte beschrijving

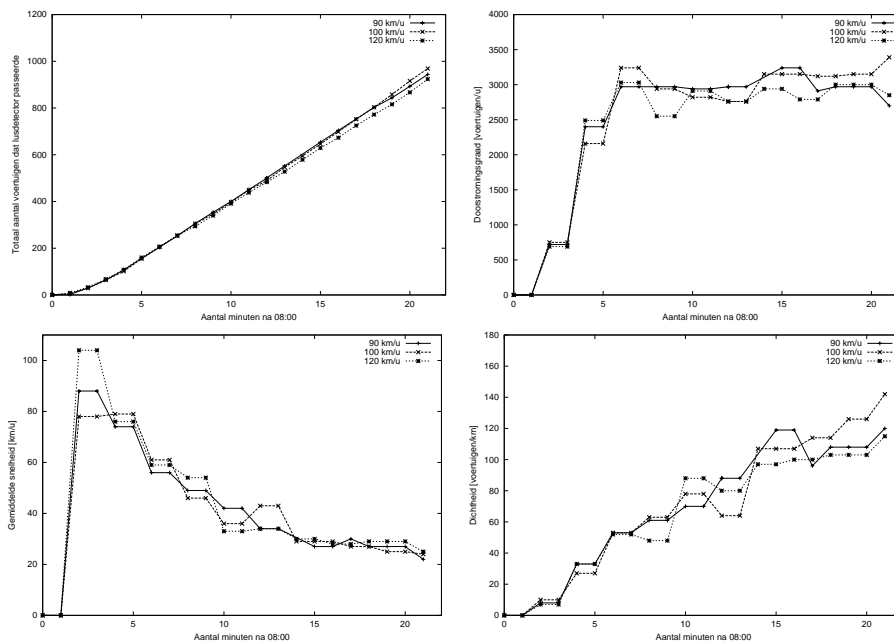
Op de Antwerpse Ring geldt een snelheidsbeperking van 100 km/u, terwijl deze op de Belgische autosnelwegen 120 km/u bedraagt. Deze hypothese onderzoekt het effect dat verschillende snelheidsbeperkingen kunnen hebben op de verkeersstroom. Volgende snelheden worden getest : 90 km/u en 120 km/u. Tijdens het uitvoeren van het referentie-experiment in het vorige hoofdstuk werd de standaard snelheidsbeperking van 100 km/u gebruikt, deze kunnen we dan ook zonder aanpassing overnemen.

9.2.2 Voorbereiden van de experimenten

Voor elke test diende de snelheidsbeperking op de autosnelwegen aangepast te worden. Enkel de Antwerpse Ring zelf werd aangepast, op de E17 blijft een snelheidsbeperking van 120 km/u gelden.

9.2.3 Resultaten van de experimenten

Figuur 9.1 toont de bekomen resultaten voor lusdetector LD1. Op de X-as staat altijd het aantal minuten na 08:00. Op de Y-as staat voor de grafiek linksboven het totaal aantal voertuigen dat de lusdetector heeft gepasseerd, rechtsboven de doorstromingsgraad, linksonder de gemiddelde snelheid en rechtsonder de dichtheid.



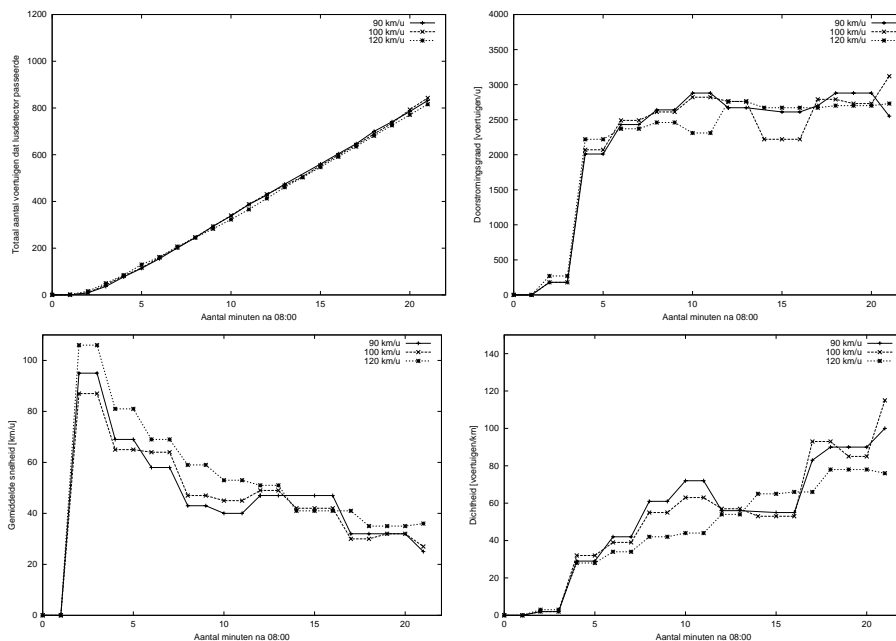
Figuur 9.1: Resultaten van experiment 1 bekomen aan lusdetector LD1.

In figuur 9.2 is dezelfde informatie te zien, maar dan voor lusdetector LD2.

In beide figuren is te zien dat het totaal aantal voertuigen dat de lusdetector passeert het hoogst is bij 100 km/u, de verschillen zijn echter verwaarloosbaar.

Bij lusdetector LD1 blijkt dat 100 km/u de beste doorstromingsgraad oplevert en 120 km/u de slechtste, bij lusdetector LD2 kan eenzelfde fenomeen vastgesteld worden. De reden hiervoor is dat door het tunneleffect de vrachtwagens meer moeite met de steile helling hebben waardoor zij het verkeer ophouden, ook al kan dit sneller stromen.

Wat de gemiddelde snelheid betreft, merken we dat deze bij het inrijden van de tunnel ongeveer dezelfde is voor alle drie de scenario's. Dit komt doordat het verkeer daar sterk opgestopt is. Bij het uitrijden van de tunnel is er echter minder opstopping wat resulteert in een hogere gemiddelde snelheid bij 120 km/u.



Figuur 9.2: Resultaten van experiment 1 bekomen aan lusdetector LD2.

De grafieken van de dichtheid tonen dat deze het grootste is voor 100 km/u, zowel bij lusdetector LD1 als lusdetector LD2. Bij 120 km/u is de dichtheid meestal kleiner omdat de voertuigen dan sneller mogen rijden.

9.2.4 Conclusies

Op basis van de bekomen resultaten blijkt dat het verhogen van de snelheidsbeperking enkel een merkbare invloed heeft bij het uitrijden van de tunnel. Het heeft geen effect op het opgestopte verkeer dat zich vormt aan de oprit van de A12 en de Jan De Voslei. Dus, 100 km/u blijkt de meest optimale snelheidsbeperking.

Naast deze experimenten zou men ook het effect van nog hogere snelheidsbeperkingen kunnen onderzoeken, maar me dunkt dat er dan onveilige situaties op de rijbaan worden geïntroduceerd wat het nut van dergelijke hogere snelheidsbeperkingen dan weer in vraag stelt.

9.3 Het opleggen van een inhaalverbod

9.3.1 Korte beschrijving

Sinds enige tijd zijn de wegmarkeringen aan de ingang van de Kennedytunnel te Linkeroever, richting Antwerpen, veranderd. Vroeger kon men zich vrijelijk over de drie vakken begeven, terwijl er nu een beperking is : inhalen door van het middelste vak naar het derde vak (links) te rijden is verboden.

Deze hypothese onderzoekt het effect dat een totaal inhaalverbod heeft : de voertuigen dienen in hun vak te blijven en mogen niet afwijken van deze regel.

9.3.2 Voorbereiden van de experimenten

Voor dit experiment werden de wegmarkeringen voor de vakken op de hoofdbaan van de Antwerpse Ring aangepast : er worden ononderbroken strepen gebruikt. Het inhaalverbod geldt vanaf de oprit van het verkeer dat van de E34 op de R1 komt (richting Antwerpen) tot aan de ingang van de Kennedytunnel zelf. Aan de kant van Antwerpen geldt ook een inhaalverbod voor de oprit van de A12 op de R1 en dit geldt eveneens tot de ingang van de Kennedytunnel. De resultaten van dit experiment werden vergeleken met die van het referentie-experiment dat de standaard wegmarkeringen gebruikt (en dus geen inhaalverbod oplegt).

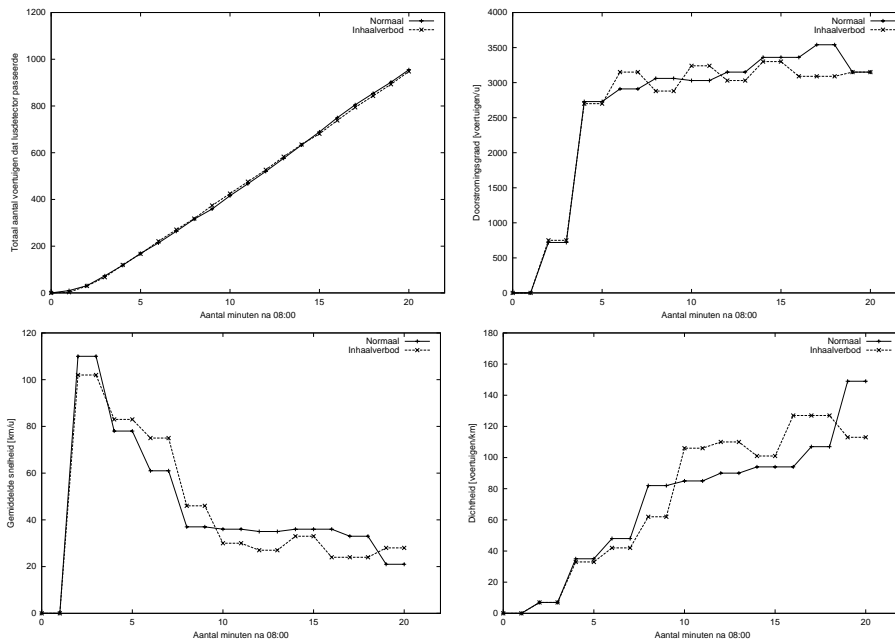
9.3.3 Resultaten van de experimenten

Figuur 9.3 toont de bekomen resultaten voor lusdetector LD3. Op de X-as staat altijd het aantal minuten na 08:00. Op de Y-as staat voor de grafiek linksboven het totaal aantal voertuigen dat de lusdetector heeft gepasseerd, rechtsboven de doorstromingsgraad, linksonder de gemiddelde snelheid en rechtsonder de dichtheid.

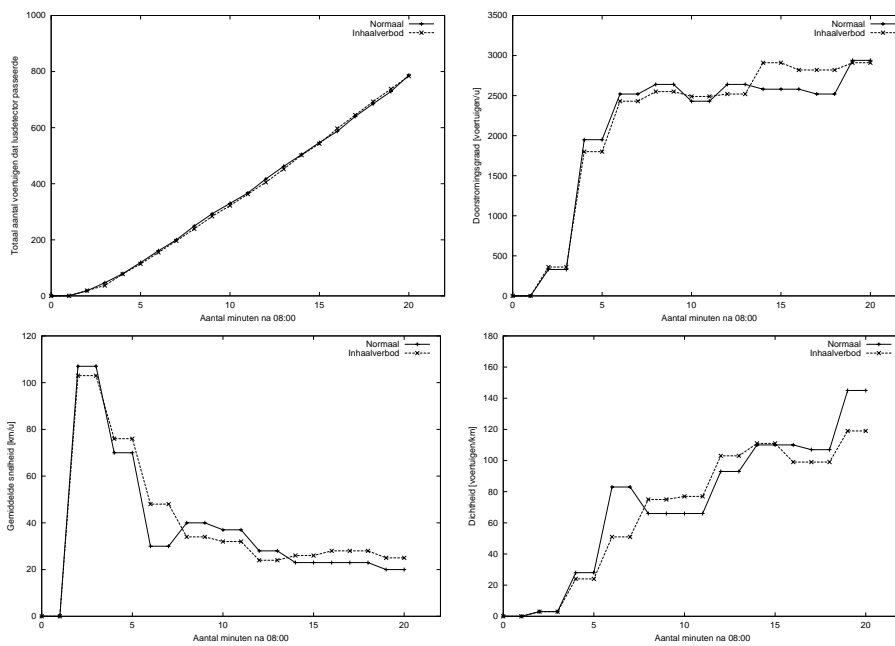
In figuur 9.4 is dezelfde informatie te zien, maar dan voor lusdetector LD4.

Een inhaalverbod heeft blijkbaar geen effect op het totaal aantal voertuigen dat beide lusdetectoren LD3 en LD4 passeert.

Wat de doorstromingsgraad betreft, valt op te merken dat deze bij het inrijden van de tunnel hoger ligt indien er *geen* inhaalverbod van kracht is, bij het uitrijden van de tunnel is de situatie omgekeerd. De reden hiervoor is dat bij het inrijden van de tunnel het verkeer komende van de E34 en Linkeroever enkel op het uiterst linkse vak kan rijden indien er een inhaalverbod geldt. Dit maakt dat er minder voertuigen (van beide opritten) per tijdseenheid de tunnel binnenrijden. Indien



Figuur 9.3: Resultaten van experiment 2 bekomen aan lusedetector LD3.



Figuur 9.4: Resultaten van experiment 2 bekomen aan lusedetector LD4.

er geen inhaalverbod geldt dan kan dit verkeer zich beter mengen met verkeer

komende van de E17, wat resulteert in meer opstoppingen.

Als de gemiddelde snelheid bij lusdetector LD3 wordt beschouwd, dan blijkt deze lager te liggen indien er een inhaalverbod geldt. De reden hiervoor is dat de vrachtwagens die van beide opritten komen ook het verkeer in het derde vak gaan ophouden. Tussen lusdetectoren LD3 en LD4 gaan deze vrachtwagens van vak veranderen zodat de gemiddelde snelheid – gemeten bij lusdetector LD4 – voor beide scenario's weinig verschilt.

De dichtheid blijkt bij lusdetector LD3 hoger te liggen indien het inhaalverbod geldt. Dit komt doordat er dan meer vrachtwagens over de vakken verspreid zijn, ze kunnen waarschijnlijk immers niet allemaal naar de rechtse vakken gaan omdat in de tunnel het verkeer nog teveel vermengd is.

9.3.4 Conclusies

De resultaten beschouwend, stel ik vast dat langs de ene kant het opleggen van een inhaalverbod geen hogere doorstromingsgraad of gemiddelde snelheid tot gevolg heeft, er is eerder sprake van een daling van beide grootheden. Langs de andere kant is het grote voordeel de toename aan veiligheid aangezien de meeste bestuurders zich nu enkel op hun voorligger moeten concentreren.

Merk tot slot nog op dat het veranderen van de wegmarkeringen in praktijk zeer snel kan gebeuren (op één nacht tijd) en een redelijk goedkope ingreep is in vergelijking met andere, meer gesofistikeerde oplossingen.

9.4 Beperkingen op het baangebruik door zwaar verkeer

9.4.1 Korte beschrijving

In de omgeving van de Kennedytunnel zijn vrij steile hellingen aanwezig wat maakt dat vrachtwagens grote snelheidsveranderingen ondergaan. Een voorbeeld hiervan is het tunneleffect wat maakt dat voertuigen met redelijke snelheid de Kennedytunnel inrijden maar deze slechts met matige snelheid zullen verlaten. Daarenboven is het dan ook nog eens zo dat zwaar verkeer slechts veel trager kan optrekken om de gewenste snelheid te bereiken. Dit kan als gevolg hebben dat de twee rechtse vakken volledig geblokkeerd worden door vrachtwagens die in kolonne hun reis verderzetten. Hierdoor is er slechts één vak maar beschikbaar – namelijk het uiterst linkse – voor personenwagens om deze vrachtwagens in te

halen. Het Belgisch verkeersreglement schrijft voor dat vrachtwagens zich niet op dit uiterst linkse vak mogen begeven.

Deze hypothese onderzoekt het effect van het beperken van het aantal vakken dat kan worden gebruikt door vrachtwagens.

9.4.2 Voorbereiden van de experimenten

Er worden twee experimenten uitgevoerd : het eerste dat vrachtwagens enkel op het uiterst rechtse vak laat rijden en het tweede dat vrachtwagens op alle drie de vakken laat rijden. In het referentie-experiment wordt al de standaardbeperking gebruikt, namelijk dat vrachtwagens enkel de twee rechtse vakken mogen gebruiken, zodat dit zonder aanpassing kan overgenomen worden.

9.4.3 Resultaten van de experimenten

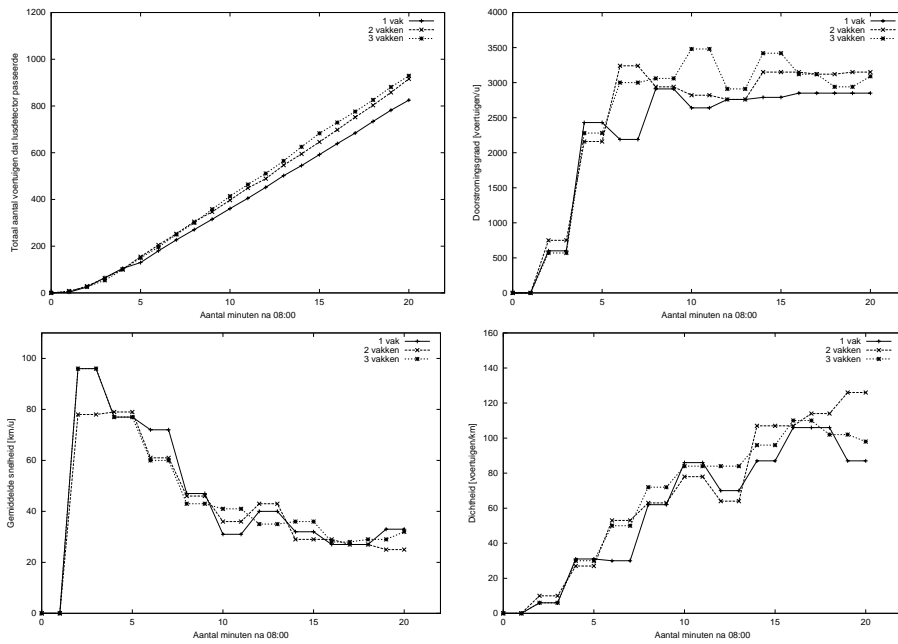
Figuur 9.5 toont de bekomen resultaten voor lusdetector LD1. Op de X-as staat altijd het aantal minuten na 08:00. Op de Y-as staat voor de grafiek linksboven het totaal aantal voertuigen dat de lusdetector heeft gepasseerd, rechtsboven de doorstromingsgraad, linksonder de gemiddelde snelheid en rechtsonder de dichtheid.

In figuur 9.6 is dezelfde informatie te zien, maar dan voor lusdetector LD2.

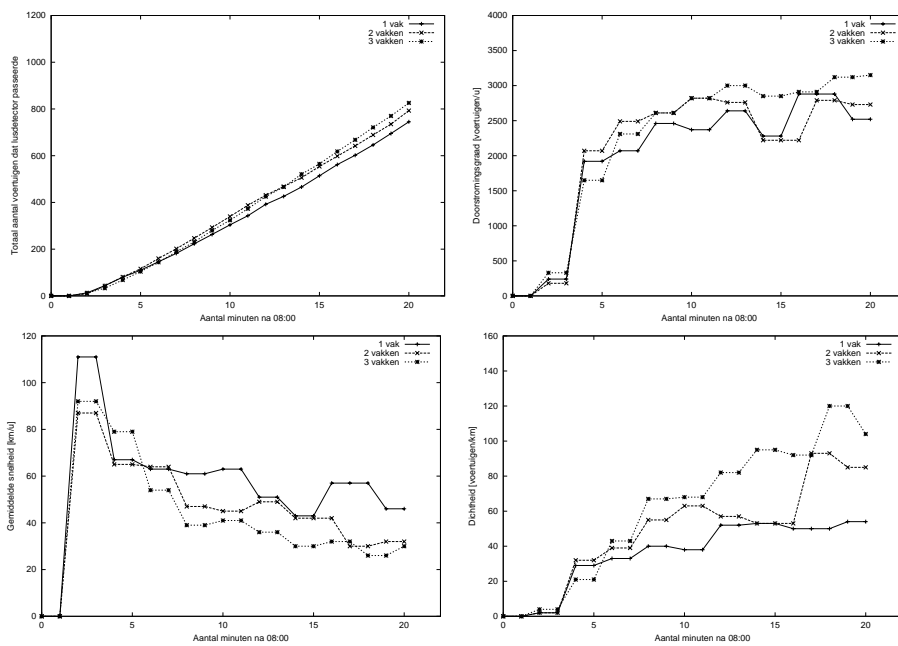
Indien we het totaal aantal voertuigen beschouwen dat lusdetectoren LD1 en LD2 passeert dan merken we dat dit aantal hoger ligt naarmate de vrachtwagens op meer vakken mogen rijden. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er dan minder opstopping wordt gevormd bij het binnenrijden van de tunnel. Hetzelfde geldt voor het uitrijden van de tunnel, waar meestal geen opstopping meer is, tenzij op het uiterst rechtse vak waar normaal gezien alle vrachtwagens achter elkaar rijden.

De doorstromingsgraad beschouwend, blijkt dat deze hoger ligt indien vrachtwagens zich op meer vakken mogen begeven. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat wanneer vrachtwagens op alle vakken rijden er een vorm van *blokrijden* optreedt waardoor al het verkeer gevangen zit achter de voertuigen die voorop rijden. Dit heeft als gevolg dat de versnellingen van alle voertuigen onderhevig zijn aan dit vooroprijdend verkeer. Dit is een vergelijkbaar effect dat ook optrad bij het opleggen van een inhaalverbod ; in dat experiment bevonden alle voertuigen zich immers in het voertuig-volg regime.

Wat de gemiddelde snelheid betreft, is er een verschil tussen het inrijden en het uitrijden van de tunnel. Bij het inrijden merken we dat bij lusdetector LD1 de gemiddelde snelheden voor de verschillende scenario's ongeveer naar dezelfde



Figuur 9.5: Resultaten van experiment 3 bekomen aan lusdetector LD1.



Figuur 9.6: Resultaten van experiment 3 bekomen aan lusdetector LD2.

waarde convergeren. Bij lusdetector LD2 is het echter anders : de gemiddelde

snelheid ligt hier lager indien vrachtwagens op meer vakken mogen rijden. Een verklaring hiervoor moeten we zoeken in het feit dat bij het uitrijden van de tunnel de vrachtwagens meer moeite met de steile helling hebben. Indien zij dan op meer vakken mogen rijden, zullen zij het verkeer ook meer ophouden.

De dichtheid ligt bij beide lusdetectoren LD1 en LD2 hoger indien vrachtwagens op meer vakken mogen rijden. Dit is logisch aangezien zij dan meer plaats op de rijbaan kunnen innemen.

9.4.4 Conclusies

Net zoals bij het experiment met het inhaalverbod blijkt dat het beperken van het vakgebruik door vrachtwagens geen verbetering van de condities op de rijbaan met zich meebrengt. Indien vrachtwagens echter op alle vakken mogen rijden dan treedt er een vorm van *blokrijden* op waardoor het verkeer gestroomlijnder en veiliger kan verlopen. Een nadeel is dan wel dat de gemiddelde snelheid lager zal liggen.

9.5 De invloed van middenvakrijders

9.5.1 Korte beschrijving

Het verkeersreglement in België specificeert dat voertuigen indien mogelijk uiterst rechts op de rijbaan moeten rijden. Dit gedrag wordt ook in *Mitrasim 2000* ondersteund. Maar, zoals in werkelijkheid, zijn er ook bestuurders die weigeren om zich naar uiterst rechts te begeven met als gevolg dat zij soms in het midden van de rijbaan blijven rijden, ook al is er rechts van hen een leeg vak. Het resultaat is dat de achterliggers meestal moeten inhouden en dit voertuig langs links voorbijgaan, want langs rechts inhalen is verboden.

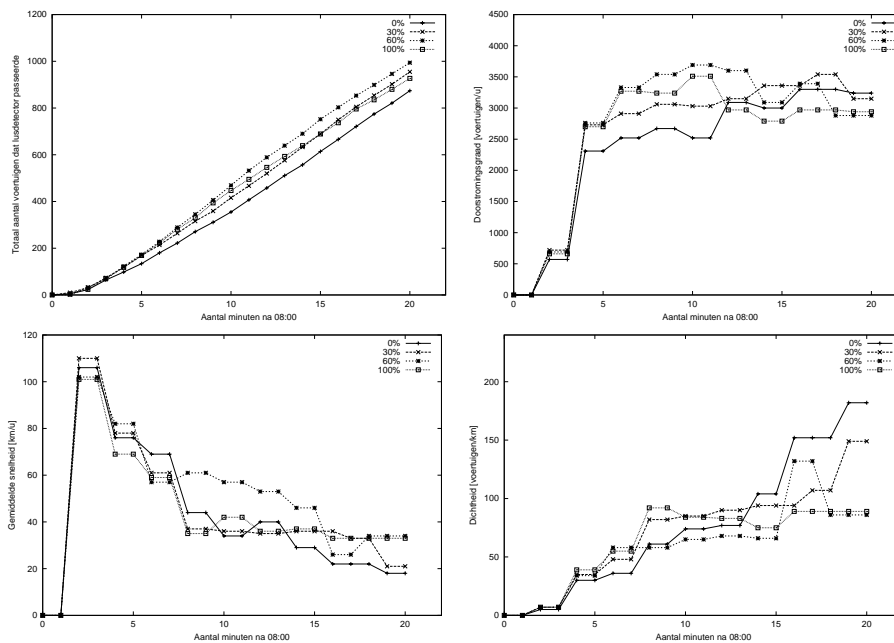
In deze hypothese wordt het aantal middenvakrijders procentueel verhoogd van 0% tot 100% en het effect daarvan bestudeerd.

9.5.2 Voorbereiden van de experimenten

Het voorbereiden van de experimenten vereist voor elke test een wijziging van de parameter die het aantal middenvakrijders in de simulator voorstelt. De parameter neemt volgende waarden aan : 0%, 60% en 100%. In het referentie-experiment uit het vorige hoofdstuk werd reeds een waarde van 30% gebruikt, deze kunnen we hier dan ook zonder aanpassing overnemen.

9.5.3 Resultaten van de experimenten

Figuur 9.7 toont de bekomen resultaten voor lusdetector LD3. Op de X-as staat altijd het aantal minuten na 08:00. Op de Y-as staat voor de grafiek linksboven het totaal aantal voertuigen dat de lusdetector heeft gepasseerd, rechtsboven de doorstromingsgraad, linksonder de gemiddelde snelheid en rechtsonder de dichtheid.

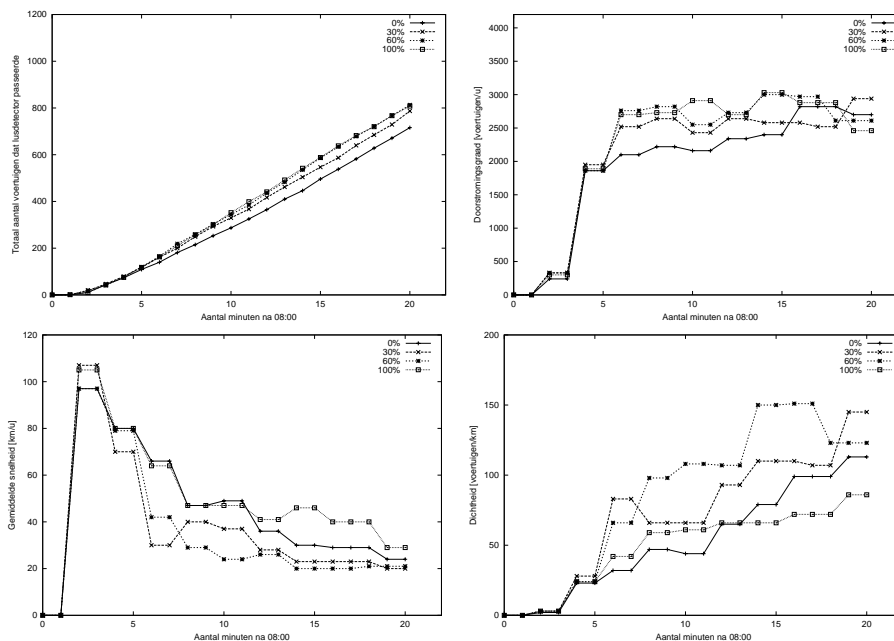


Figuur 9.7: Resultaten van experiment 4 bekomen aan lusdetector LD3.

In figuur 9.8 is dezelfde informatie te zien, maar dan voor lusdetector LD4.

Indien we het totaal aantal voertuigen dat beide lusdetectoren LD3 en LD4 passeert beschouwen, dan merken we dat er een groot verschil is tussen de totale afwezigheid en aanwezigheid van middenvakrijders. De hoogste aantallen treden echter op wanneer het percentage middenvakrijders 60% bedraagt.

De doorstromingsgraad beschouwend, merken we dat deze bij lusdetector LD3 afneemt indien er meer middenvakrijders zijn. Dit kan verklaard worden doordat het verkeer op het uiterst rechtse vak nu bijna enkel bestaat uit verkeer komende van de E17 en niet van de E34 en Linkeroever (deze laatste zijn afkomstig van twee *linkse* opritten waardoor zij in het verkeer met middenvakrijders terechtkomen), er is dan meer opstopping. Bij lusdetector LD4 vind ik echter geen specifiek gedrag terug : de waarden van de doorstromingsgraden fluctueren zeer hevig in alle scenario's, het maakt blijkbaar niet veel uit hoeveel middenvakrijders er zijn.



Figuur 9.8: Resultaten van experiment 4 bekomen aan lusdetector LD4.

Hoe meer middenvakrijders er zijn, hoe hoger de gemiddelde snelheid, gemeten bij lusdetector LD3, is. Bij lusdetector LD4 merken we daarentegen dat de hoogste gemiddelde snelheid voorkomt bij 100%, vlak daarna gevolgd door 0% en pas dan 30% en 60%.

Indien we de dichtheid beschouwen dan merken we dat deze bij het inrijden van de tunnel afneemt indien er meer middenvakrijders zijn. Bij het uitrijden van de tunnel blijkt dat deze lager ligt bij de extrema 0% en 100% dan bij 30% en 60%.

9.5.4 Conclusies

Naar aanleiding van de resultaten van de experimenten ben ik ervan overtuigd dat de rol van middenvakrijders nog niet helemaal doorgrond is. Een indicatie hiervoor wordt gevormd door het feit dat het *niet* zo is dat indien het percentage middenvakrijders toeneemt, een verkeersstroom evenredig mee verandert. In de resultaten viel veelal te merken dat de beste waarden bekomen worden bij een percentage van 60%. Dit doet me geloven dat er sprake is van een lokaal optimum : teveel middenvakrijders is niet goed, maar te weinig ook niet. Verder onderzoek naar de rol van het concept middenvakrijder verdient dan ook mijn aanbeveling.

9.6 Het gebruik van een extra vak

9.6.1 Korte beschrijving

Vroeger hoorde men vaak vertellen dat drie vakken per koker in de Kennedytunnel meer dan genoeg zouden zijn. Men verwachtte toen nog niet dat het verkeer zo sterk exponentieel zou toenemen. Een hypothese die vandaag de dag getest kan worden, is of een extra vierde vak al dan niet zou helpen. In praktijk is dit zeer moeilijk te testen aangezien het niet zo evident is om een vierde vak te leggen (milieuproblemen, geografische problemen, ...). Wat men eventueel wel zou kunnen doen is de pechstrook ook in gebruik nemen, maar dat brengt dan weer de veiligheid in het gedrang want nu kunnen de hulpdiensten niet meer snel ter plaatse zijn indien er een ongeval gebeurt in sterk opgestopt verkeer.

Merk op dat het op dit moment *niet* meer mogelijk is om een vierde vak per koker in de Kennedytunnel te leggen, enkel op de Antwerpse Ring zou dit kunnen. Deze hypothese probeert dus enkel een ‘wat-als?’-scenario te bestuderen.

9.6.2 Voorbereiden van de experimenten

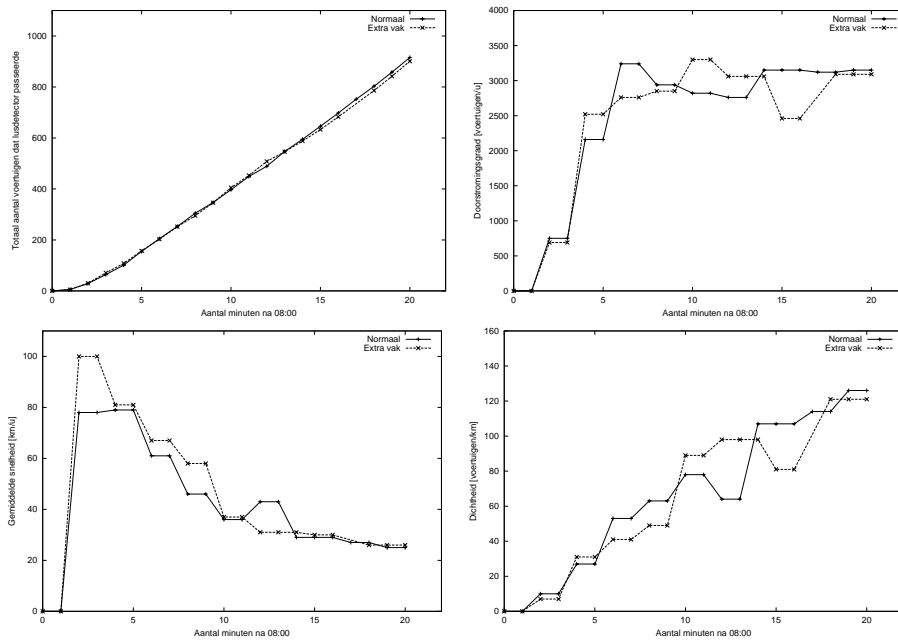
Voor dit experiment diende het wegennetwerk ingrijpend te veranderen : voor elke verbinding diende een extra vak gespecificeerd te worden. De vakovergangen dienden aangepast te worden aan de ingang van de Kennedytunnel te Linkeroever (dit om conform te blijven met de huidige wegmarkeringen). De resultaten van het referentie-experiment – dat op drie vakken gebaseerd is – werden overgenomen ter vergelijking.

Merk op dat er *wel* vier vakken per koker in de Kennedytunnel gelegd worden, aangezien de simulator geen expliciete versmallingen of verbredingen van de rijbaan ondersteunt.

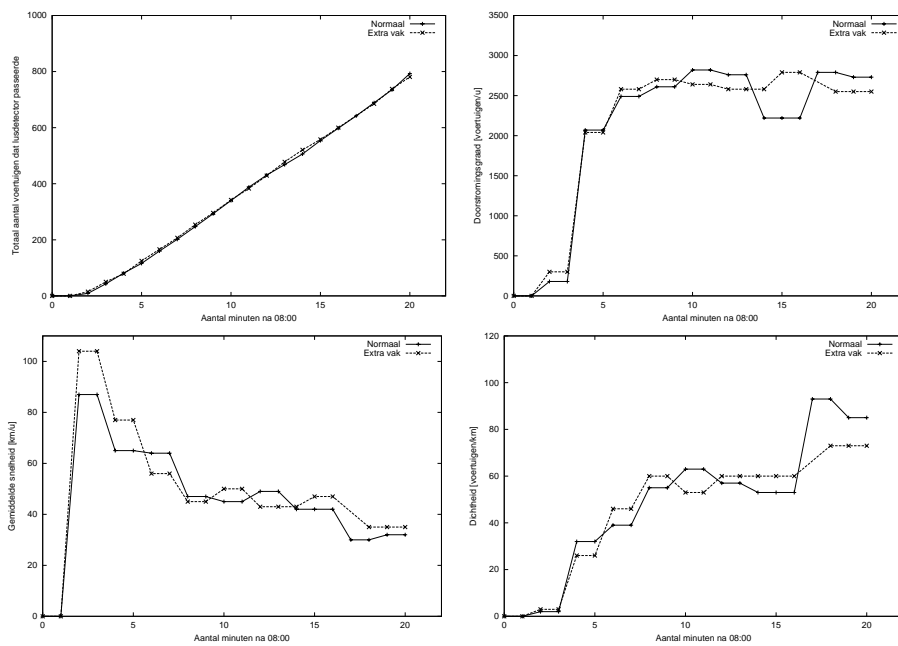
9.6.3 Resultaten van de experimenten

Figuur 9.9 toont de bekomen resultaten voor lusdetector LD1. Op de X-as staat altijd het aantal minuten na 08:00. Op de Y-as staat voor de grafiek linksboven het totaal aantal voertuigen dat de lusdetector heeft gepasseerd, rechtsboven de doorstromingsgraad, linksonder de gemiddelde snelheid en rechtsonder de dichtheid.

In figuur 9.10 is dezelfde informatie te zien, maar dan voor lusdetector LD2.



Figuur 9.9: Resultaten van experiment 5 bekomen aan lusdetector LD1.



Figuur 9.10: Resultaten van experiment 5 bekomen aan lusdetector LD2.

Voor beide lusdetectoren LD1 en LD2 blijkt dat het totaal aantal voertuigen dat

deze lusdetectoren passeert zo goed als onveranderd blijft indien er een extra vak wordt gebruikt. Dit komt doordat de simulator evenveel werk heeft in beide gevallen en dus niet meer voertuigen kan genereren in het geval er een extra vak ligt. Dit is een beperking van de simulator maar de impact ervan is verwaarloosbaar.

Zeer opmerkelijk is dat er *geen significante verschillen* optreden in doorstromingsgraden, gemiddelde snelheden en dichtheden bij het gebruik van een extra vak. Indien er een extra vak wordt gebruikt dan kunnen er meer voertuigen per tijds-eenheid de Kennedytunnel in- en uitrijden, echter, de simulator genereert geen grotere hoeveelheid voertuigen, vandaar dat een verandering niet merkbaar is.

9.6.4 Conclusies

Het gebruik van een extra vak is mijns inziens een nutteloze investering die geen vruchten afwerpt : de verschillen zijn te miniem om enige belangrijke rol te kunnen spelen.

Merk op dat indien een extra vak *wel* zou werken dit het probleem aan de Kennedytunnel *niet* zal wegnemen aangezien deze nog altijd een flessenhals vormt en het zo goed als onmogelijk is de tunnel uit te breiden met een extra vak.

9.7 Conclusies

In dit hoofdstuk werden diverse hypothesen toegelicht en voor elke hypothese werden experimenten uitgevoerd met behulp van de in de vorige hoofdstukken ontwikkelde simulator, Mitrasim 2000.

De belangrijkste conclusies die men uit dit hoofdstuk moet onthouden, zijn :

- het verhogen van de snelheidsbeperking levert geen voordelen op bij het inrijden van de Kennedytunnel, enkel bij het uitrijden ervan wordt een hogere gemiddelde snelheid gemeten. Op beide plaatsen geldt dat de doorstromingsgraad *niet* verbetert met een hogere snelheidsbeperking.
- Het opleggen van een inhaalverbod levert enerzijds een lagere doorstromingsgraad op maar anderzijds resulteert dit wel een veiligere verkeerssituatie.
- Het veranderen van het vakgebruik door vrachtwagens kan een verbetering opleveren indien deze op alle vakken mogen rijden, wat aanleiding geeft tot

een vorm van *blokrijden* waardoor het verkeer efficiënter kan verlopen. Een groot nadeel is dan wel dat de gemiddelde snelheid lager zal liggen.

- De rol van middenvakrijders blijkt meer geraffineerd te zijn dan aanvankelijk gedacht : zij blijken nodig te zijn om een optimale verkeersstroom te garanderen, maar dit is sterk afhankelijk van het percentage middenvakrijders – ik vermoed dat er een lokaal optimum ligt rond 60% – wat maakt dat verder onderzoek zeker nodig is.
- Tot slot blijkt dat een extra vak geen beduidende impact heeft op een verkeersstroom.

Merk op dat al deze hypothesen en experimenten niets zeggen over de *oorzaken en het ontstaan* van files. Zij kunnen enkel een licht werpen op de invloed die bepaalde factoren op een file hebben.

Wat goed in het achterhoofd gehouden dient te worden is het volgende aandachtspunt : alle experimenten werden uitgevoerd onder zeer specifieke omstandigheden en op zeer specifieke plaatsen, wat maakt dat de algemene geldigheid van deze hypothesen in vraag kan gesteld worden. Anders gezegd : de conclusies van de hypothesen zijn, volgens het gebruikte model, geldig op de Antwerpse Ring, echter op andere plaatsen kan geen uitspraak gedaan worden over de geldigheid ervan, zonder ook daarvoor experimenten uit te voeren.

Een algemene conclusie is de volgende : om de steeds maar toenemende verkeersproblemen efficiënt aan te pakken, is het nodig dat er een algemene coördinatie op grote schaal komt. Centraal hierin staan de concepten verkeersbeheer en verkeerszorg. Een beter gebruik van de transportmiddelen en infrastructuur komt de economie sterk ten goede.

Deel IV

En verder...

Hoofdstuk 10

Nabespreking

Inleiding

In dit laatste hoofdstuk wordt een nabespreking gegeven van hetgeen in deze thesis allemaal aan bod kwam. Eerst is er een samenvatting van het verrichte werk, vervolgens worden de tekortkomingen van het gebruikte model toegelicht, daarna wordt de maatschappelijke bijdrage van deze thesis besproken en tenslotte worden er plannings op korte en lange termijn geschetst.

10.1 Samenvatting

In deze thesis zijn twee belangrijke componenten terug te vinden : een uitgebreide literatuurstudie die in deel één aan bod komt gevolgd door een uitwerking van mijn eigen werk dat in delen twee en drie wordt voorgesteld.

In de literatuurstudie worden de grondbeginselen besproken waarop mijn eigen werk gebaseerd is. Deze grondbeginselen omvatten allerlei meettechnieken, karakteristieken van verkeersstromen, diverse modellen van verkeersstromen, diverse modellen van bestuurdersgedrag en een bespreking van de soorten simulators die er bestaan.

Mijn eigen werk is opgesplitst in twee delen : het eerste deel vormt een wetenschappelijke afbakening waarin eerst de probleemstelling uit de doeken wordt gedaan, gevolgd door een uitgebreide voorstelling van een oplossingsmethode om deze probleemstelling aan te pakken. Bij dit laatste wordt dan ook het wiskundig model ontwikkeld waarop de simulator *Mitrasim 2000* gebaseerd is. In het tweede

deel wordt deze simulator dan concreet gebruikt : eerst en vooral wordt een overzicht gegeven van welke gegevens voorhanden zijn waarna het gebruikte model wordt gevalideerd en zo goed mogelijk gekalibreerd. Tenslotte wordt er een referentie-experiment uitgevoerd waarna het belangrijkste stuk van deze thesis komt : het formuleren en evalueren van een vijftal hypotheses.

De eindconclusies zijn dat het verhogen van de snelheidsbeperking geen voordelen oplevert, het verlagen levert echter wel een voordeel op, namelijk een hogere gemiddelde snelheid. Het opleggen van een inhaalverbod levert geen hogere doorstromingsgraad op maar wel een veiligere verkeerssituatie en het veranderen van het vakgebruik door vrachtwagens kan een verbetering opleveren indien deze op alle vakken mogen rijden, wat aanleiding geeft tot een vorm van *blokrijden* waardoor het verkeer efficiënter kan verlopen. De rol van middenvakrijders blijkt niet zo duidelijk te zijn : zij blijken nodig te zijn om een optimale verkeersstroom te garanderen, maar dit is sterk afhankelijk van het percentage middenvakrijders – er blijkt een lokaal optimum te zijn – wat maakt dat verder onderzoek zeker nodig is. Tot slot blijkt dat een extra vak geen beduidende impact heeft op een verkeersstroom.

10.2 Een kritische beschouwing van het model

In het vorige hoofdstuk werden vijf hypotheses voorgesteld waarna deze aan de hand van experimenten werden beoordeeld. Men dient zich echter kritisch op te stellen ten opzichte van de conclusies die toen werden gevormd. Naast het feit dat alle experimenten onder zeer specifieke omstandigheden werden uitgevoerd, namelijk de situatie op de Antwerpse Ring bij opgestopt verkeer, is er ook nog eens het feit dat we hier te maken hebben met een microscopische simulator. In wat volgt wordt er dieper ingegaan op de tekortkomingen die zich manifesteren bij het gebruik van de simulator.

10.2.1 Ondersteunde linktypes

Zoals in paragraaf 6.4.1 reeds werd vermeld, worden niet alle soorten verbindingen door de simulator ondersteund. Dit komt doordat tijdens de ontwikkeling er een aantal praktische en moeilijk oplosbare problemen de kop opstaken. Als gevolg hiervan besloot ik slechts een beperkte verzameling van verbindingen te ondersteunen.

Het nadeel hiervan is dat nu een belangrijk stuk van de Antwerpse Ring, namelijk de op- en afritten te Berchem, niet correct gemodelleerd kan worden. Op dit stuk

treedt er een verweving van verkeersstromen op doordat voertuigen de Ring op hetzelfde punt verlaten en opkomen. De impact hiervan kon dus niet onderzocht worden in deze thesis.

10.2.2 Berekende doorstromingsgraden

De doorstromingsgraden die door de lusdetectoren berekend werden, kunnen niet als absolute cijfers geïnterpreteerd worden. De binding met de werkelijkheid is zeer klein omwille van twee redenen :

- de oorspronkelijke voertuigtellingen die werden gebruikt zijn van zeer slechte kwaliteit (zie paragraaf 7.3.2 voor meer details hieromtrent)
- en vermits de simulator een complex stuk software is dat veel rekentijd nodig heeft om te draaien, kunnen ook geen grote verkeersvolumes gegenereerd worden : een experiment dat zeven uur liep, leverde een volume van slechts 2500 voertuigen op !

Dit maakt dus dat de berekende doorstromingsgraden niet representatief zijn, ze kunnen enkel relatief geïnterpreteerd worden. Bij het bespreken van de resultaten van de hypothesen wordt dan ook de klemtoon gelegd op het feit dat een verandering in doorstromingsgraad belangrijker is dan de exacte waarde van die doorstromingsgraad.

10.2.3 Gebruikte modellen

Het voertuig-volg model en het vak-verander model zijn zeer beperkt in hun werking : per voertuig worden enkel de voertuigen in de onmiddellijk nabije omgeving beschouwd. Op basis van deze voertuigen worden dan beslissingen genomen die het gedrag van het voertuig in kwestie in de verkeersstroom beschrijven. In werkelijkheid gaan bestuurders echter met veel meer zaken rekening houden, zoals de verkeerssituatie voorop en dergelijke.

10.2.4 Geen weersomstandigheden

In het ontwikkelde model wordt ook geen rekening gehouden met de weersomstandigheden. Dit kan nochtans wel belangrijk zijn aangezien bestuurders hun gedrag aanpassen aan het weer. Echter, werken met weersomstandigheden vereist een zeer goede kalibratie van de parameters omdat we anders met *guesimates* (zie paragraaf 6.2.2) zitten te werken.

10.2.5 Conclusies

Na alle tekortkomingen van de simulator te hebben beschouwd, is het duidelijk dat er nog serieus wat werk dient te gebeuren vooraleer een model bekomen wordt dat volledig op punt staat en direct in praktijk kan gebruikt worden.

Mijn advies luidt dan ook : een microscopisch model werkt, maar enkel onder de voorwaarde dat alle parameters goed gekalibreerd zijn. *Kalibratie is noodzakelijk om met een goed model te kunnen werken.* Dus in plaats van direct een model te gaan ontwikkelen zou het volgens mij beter zijn om eerst eens te kijken naar welke gegevens voorhanden zijn en hoe deze gebruikt kunnen worden. Ik denk dat op deze manier veel parameterschattingen vermeden kunnen worden.

10.3 Maatschappelijke bijdrage

Deze thesis sneed een belangrijk onderwerp aan, namelijk de fileproblematiek die tegenwoordig in België heerst. Diverse hypothesen werden voorgesteld waaruit na het verrichten van de nodige experimenten conclusies werden geformuleerd.

Algemeen gesteld blijkt dat men niet zomaar een uitspraak kan doen zonder daar eerst de geldigheid van onderzocht te hebben, deze thesis biedt dan ook enkele concrete antwoorden op concrete vragen. Ze is een uitgebreid naslagwerk voor mensen die onderzoek willen verrichten naar het microscopisch simuleren van verkeersstromen.

Wat het gebruik van de software die deel uitmaakt van deze thesis betreft, kan gesteld worden dat deze *niet* real-time kan gebruikt worden om aan verkeersbeheer te doen. De redenen hiervoor zijn dat het enerzijds veel te lang duurt om een simulatie uit te voeren en dat er anderzijds geen voorzieningen in het model zijn om met Intelligente Transport Systemen (ITS) te werken. Wat wel kan onderzocht worden, is het effect van bepaalde parameters op het gedrag van een verkeersstroom.

Tot slot is er nog een grote troef die het ontwikkelde softwarepakket biedt : men kan namelijk bijna eender welk wegennetwerk van autosnelwegen modelleren en aan tests onderwerpen !

10.4 De toekomst

10.4.1 Op korte termijn

Op korte termijn zouden eerst en vooral de verschillende parameters goed gekalibreerd moeten worden. Indien dit in orde is, kan men overgaan tot het toevoegen van extra parameters. Op deze manier kunnen de gebruikte modellen verfijnd worden door bijvoorbeeld de omgevingscondities in acht te nemen (zoals de verkeersdichtheid voorop).

Belangrijk zijn ook de implementaties van het voertuig-volg model en het vakverander model : verfijning en uitbreiding zijn twee zaken die onder de loep moeten genomen worden om deze modellen nog beter op punt te stellen.

Een ander aandachtspunt zijn de reismogelijkheden die de voertuigen volgen : er zou door middel van uitgebreide veldtesten een goede schatting van de verdeling van de reismogelijkheden gevonden kunnen worden zodat deze dan in het model kan gebruikt worden. Verder kan er geëxperimenteerd worden met Intelligente Transport Systemen (ITS) om de voertuigen optimaler te laten rijden. Kalibratie is ook hier weer een absolute noodzaak.

Wat betreft de implementatie van het model, is het aangeraden om de gebruikte algoritmes zo optimaal mogelijk te maken. Het is mijn overtuiging dat een groot deel van de rekentijd wordt besteed aan het uitvoeren van uitgebreide testen en dit kan eigenlijk beter. Onderzoek hiernaar is dan ook aangeraden.

10.4.2 Op lange termijn

Op langere termijn kan voor een andere implementatie gekozen worden die meer vruchten kan afwerpen : het wegennetwerk bestaat nu uit verbindingen en knooppunten wat het mogelijk maakt om zeer snel een bestaande situatie te modelleren. Bij het simuleren echter kunnen niet alle gewenste soorten verbindingen gebruikt worden, het blijkt dat óf modelleren óf simuleren vlot kan gebeuren, maar nog niet beide. Om hieraan te verhelpen lijkt het me interessant om de verbindingen op basis van vakken te beschrijven zodat voor elk vak dient opgegeven te worden welke andere vakken erbij aansluiten.

Bij het ontwikkelen van een goede microscopische verkeerssimulator is het incorporeren van stadsverkeer niet onbelangrijk. Men dient er dan wel op te letten dat er extra complicaties bij komen zoals het gebruik van verkeerslichten, voorrangregels en de complexe interacties die plaatsvinden in een complexe stadskern zoals Antwerpen.

Deel V
Appendices

Appendix A

Lijst van afkortingen

| | |
|----------|--|
| ATIS | Advanced Traveler Information System |
| ATMS | Advanced Traffic Management System |
| CORSIM | Corridor Simulation |
| DLC | discretionary lanechange |
| DTA | dynamic traffic assignment |
| DynaMIT | Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travelers |
| FHWA | Federal Highway Administration |
| FREESIM | Freeway Simulation |
| GM | General Motors |
| HCM | Highway Capacity Manual |
| ITS | Intelligente Transport Systemen |
| JDK | Java Development Kit |
| MITRASIM | Microscopic Traffic Simulator |
| MITSIM | Microscopic Traffic Simulator |
| MLC | mandatory lanechange |
| MOE | Measure of Effectiveness |
| MT | movement time |
| NETSIM | Network Simulation |
| PRT | perception reaction time |
| RNG | random number generator |
| SIMLAB | Simulation Laboratory |
| SMS | space mean speed |
| TMS | time mean speed |
| TRAQ | Traffic Flow Analysis and Queueing Theory |

Appendix B

De fundamentele vergelijking

De fundamentele vergelijking voor verkeersstromen is als volgt :

$$k = \frac{q}{\bar{v}_s}, \quad (\text{B.1})$$

met

k : de dichtheid,

q : de doorstromingsgraad,

\bar{v}_s : de snelheid uitgemiddeld in de ruimte (SMS).

Deze vergelijking werd oorspronkelijk ontwikkeld door Wardrop [WC54]. Zijn afleiding begon met de veronderstelling dat de verkeersstroom beschouwd moet worden als een aantal deelstromen waarbij alle voertuigen in dezelfde deelstroom met dezelfde snelheid bewegen en een stochastische rij vormen. Vermits ze allen met dezelfde snelheid bewegen wordt deze willekeur uitgedrukt in de onderlinge afstand tussen de voertuigen (deze is wel niet uniform).

Beschouw nu zo een deelstroom met doorstromingsgraad q_i en snelheid v_i . Het gemiddelde tijdsinterval tussen de voertuigen erin is dan $1/q_i$ en de afgelegde afstand in deze tijd is v_i/q_i . Hieruit volgt dat de dichtheid in de ruimte van deze deelstroom (dit is de concentratie, het aantal voertuigen per lengte-eenheid op elk moment) gegeven wordt door :

$$k_i = \frac{q_i}{v_i}, \quad (\text{B.2})$$

met $i \in \{1, 2, \dots, c\}$ en c het aantal deelstromen in de verkeersstroom. De volgende stap vereist het berekenen van de algemene gemiddelde snelheid op basis van de gedeeltelijke fracties van de totale dichtheid. Dit leidt tot :

$$\frac{v_s}{v_s} = \frac{\sum_i k_i v_i}{k} = \frac{\sum_i q_i}{k} = \frac{q}{k}. \quad (\text{B.3})$$

Vergelijking B.2 is dus belangrijk bij de afleiding om aan te tonen dat vergelijkingen 1.20 en B.1 geldig zijn wanneer de snelheid uitgemiddeld in de ruimte wordt gebruikt.

Merk op dat de gegeven afleiding niet zonder problemen is. Het gebruik van de term ‘gemiddelde’ moet zeer kritisch beschouwd worden : men berekent eigenlijk de gemiddelde dichtheid van de deelstroom en niet per se de exacte dichtheid van de deelstroom. Het komt er op neer dat k_i niet de echte dichtheid van de deelstroom is maar slechts een benadering ervan. Er wordt impliciet verondersteld dat zowel tussenruimtes als snelheden constant zijn.

Er blijkt nog grote verwarring te bestaan rond de termen dichtheid en bezetting. De meerderheid vindt dat de eerste term de voorkeur krijgt omdat hij al sinds de jaren '30 meegaat. Tegenwoordig zijn er echter mensen die in hun theoretisch werk meer en meer aandacht gaan besteden aan de bezetting. Twee redenen hiervoor zijn dat er enerzijds een verbeterde overeenkomst moet zijn tussen het theoretische en praktische werk op het vlak van verkeersstromen (er worden tegenwoordig meer gegevens over bezetting bekomen) en anderzijds dat dichtheid, uitgedrukt in het aantal voertuigen per lengte-eenheid, de effecten van voertuiglengtes en verkeerssamenstelling negeert. Bezetting daarentegen wordt beïnvloed door beide grootheden en geeft daardoor een betere indicatie van de hoeveelheid rijbaan die ingenomen wordt door voertuigen.

Appendix C

Simulatieparameters

C.1 Linktypes

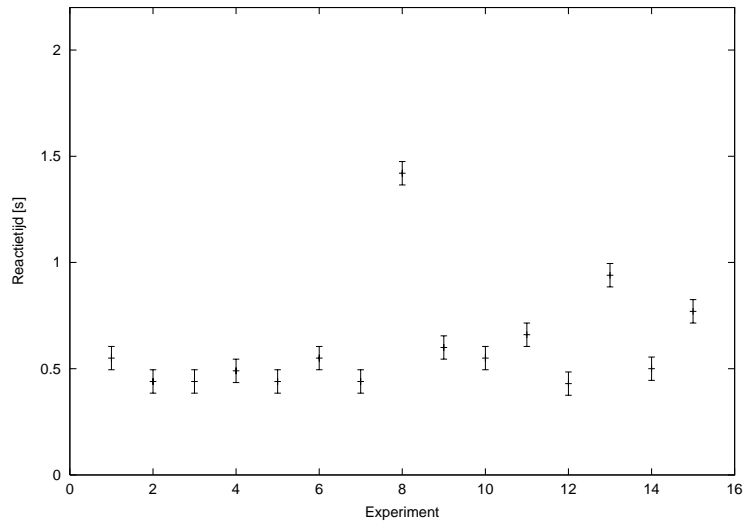
| Linktype | Minimum aantal knooppunten | Op-/afrit |
|----------------------|----------------------------|-----------|
| tunnel | 2 | / |
| autosnelweg | 2 | / |
| gescheiden oprit | 2 | ✓ |
| samen gevoegde oprit | 3 | ✓ |
| gescheiden afrit | 3 | ✓ |
| samen gevoegde afrit | 2 | ✓ |
| versmalling | 3 | / |
| verbreding | 3 | / |

Tabel C.1: Beschikbare linktypes.

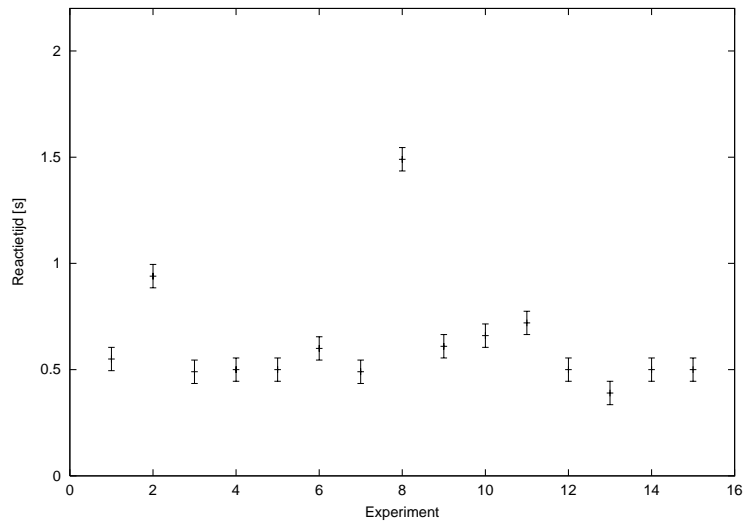
C.2 Karakteristieken van bestuurders

| Experiment | Sanne | Sven | Helga | Jo | Franky |
|------------|-------|------|-------|------|--------|
| 1 | 0,55 | 0,55 | 0,71 | 0,61 | 0,61 |
| 2 | 0,44 | 0,94 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 3 | 0,44 | 0,49 | 0,43 | 0,44 | 0,55 |
| 4 | 0,49 | 0,50 | 0,49 | 0,38 | 0,49 |
| 5 | 0,44 | 0,50 | 0,61 | 0,49 | 0,44 |
| 6 | 0,55 | 0,60 | 2,09 | 0,49 | 0,66 |
| 7 | 0,44 | 0,49 | 0,60 | 0,44 | 0,77 |
| 8 | 1,42 | 0,49 | 0,55 | 0,49 | 0,44 |
| 9 | 0,60 | 0,61 | 0,66 | 0,44 | 0,38 |
| 10 | 0,55 | 0,66 | 0,66 | 0,50 | 0,44 |
| 11 | 0,66 | 0,72 | 0,66 | 0,44 | 0,39 |
| 12 | 0,43 | 0,50 | 0,55 | 0,38 | 0,39 |
| 13 | 0,94 | 0,39 | 1,43 | 0,44 | 0,44 |
| 14 | 0,50 | 0,50 | 0,44 | 0,44 | 0,39 |
| 15 | 0,77 | 0,50 | 0,71 | 0,55 | 0,44 |
| Gemiddelde | 0,61 | 0,63 | 0,74 | 0,47 | 0,49 |
| Std. afw. | 0,26 | 0,27 | 0,44 | 0,06 | 0,11 |

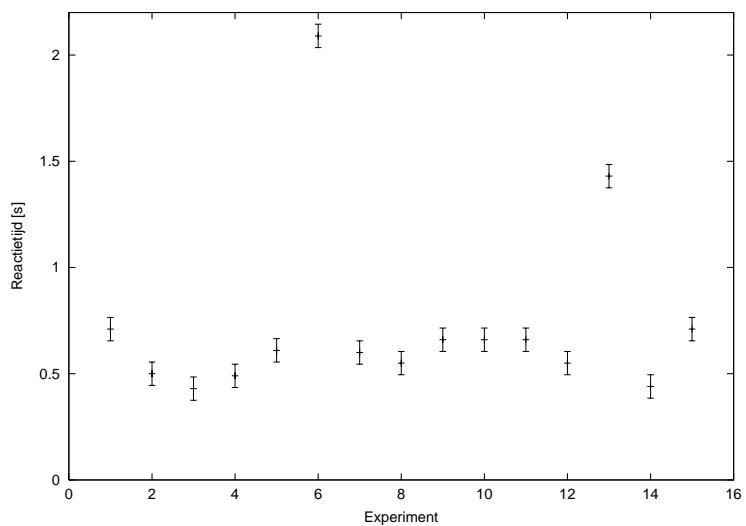
Tabel C.2: Experimenteel vastgestelde reactietijden (uitgedrukt in s) van de proefpersonen.



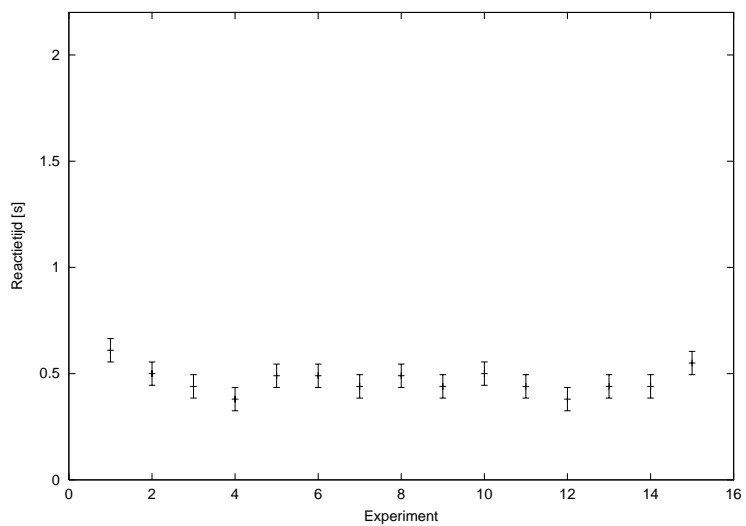
Figuur C.1: De reactietijden van Sanne Engelen (uitgedrukt in s).



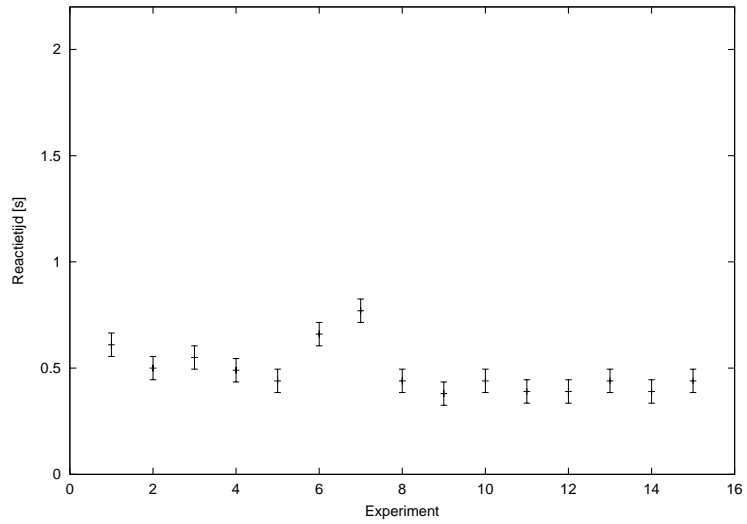
Figuur C.2: De reactietijden van Sven Maerivoet (uitgedrukt in s).



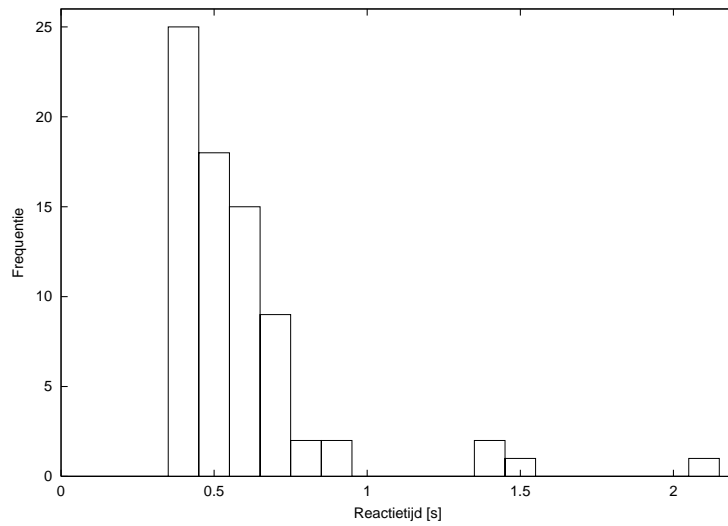
Figuur C.3: De reactietijden van Helga Boon (uitgedrukt in s).



Figuur C.4: De reactietijden van Jo Maerivoet (uitgedrukt in s).



Figuur C.5: De reactietijden van Franky Backeljauw (uitgedrukt in s).



Figuur C.6: Absolute frequenties van de reactietijden (gegroepeerd per 0,1 s) van alle proefpersonen.

| Percentage van de bestuurders (%) | ν |
|-----------------------------------|-------|
| < 5 | -16,8 |
| < 15 | -6,2 |
| < 25 | 0,7 |
| < 35 | 3,5 |
| < 45 | 7,1 |
| < 55 | 10,1 |
| < 65 | 14,6 |
| < 75 | 19,2 |
| < 85 | 32,2 |
| < 100 | 40,0 |

Tabel C.3: Cumulatieve distributiefunctie van het percentage bestuurders dat de snelheidsbeperking overtreedt (ν uitgedrukt in km/u).

C.3 Karakteristieken van voertuigen

| Soort voertuig | Lengte | Breedte | Hoogte |
|----------------|--------|---------|--------|
| personenwagen | 4,0 | 1,6 | 1,4 |
| vrachtwagen | 16,9 | 2,6 | 3,8 |

Tabel C.4: Dimensies van voertuigen (uitgedrukt in m).

| Soort voertuig | Helling (uitgedrukt in %) | | | | | | |
|----------------|---------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | < -2 | < -1 | < 0 | < 1 | < 2 | < 4 | > 4 |
| personenwagen | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| vrachtwagen | 140 | 130 | 120 | 110 | 80 | 70 | 50 |

Tabel C.5: Maximale snelheid (uitgedrukt in km/u).

| Soort voertuig | Snelheid (uitgedrukt in km/u) | | | | |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|------|
| | < 20 | 20-45 | 45-65 | 65-85 | > 85 |
| personenwagen | 2,7 | 1,8 | 1,5 | 1,0 | 0,9 |
| vrachtwagen | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | 0,4 |

Tabel C.6: Maximale versnelling op vlak terrein (uitgedrukt in m/s²).

| Soort voertuig | Snelheid (uitgedrukt in km/u) | | | | |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|------|
| | < 20 | 20-45 | 45-65 | 65-85 | > 85 |
| personenwagen | -2,4 | -2,0 | -1,5 | -1,5 | -1,5 |
| vrachtwagen | -1,5 | -1,0 | -0,7 | -0,6 | -0,5 |

Tabel C.7: Normale vertraging (uitgedrukt in m/s²).

| Soort voertuig | Snelheid (uitgedrukt in km/u) | | | | |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|------|
| | < 20 | 20-45 | 45-65 | 65-85 | > 85 |
| personenwagen | -3,0 | -2,9 | -2,7 | -2,6 | -2,5 |
| vrachtwagen | -2,0 | -1,5 | -1,0 | -0,7 | -0,6 |

Tabel C.8: Maximale vertraging (uitgedrukt in m/s^2).

C.4 Modelparameters

| Parameter | Waarde |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Simulatie starttijd | 08:00 |
| Gemiddelde reactietijd | -0,597 s |
| Standaardafwijking reactietijd | 0,326 s |
| Minimale reactietijd | 0,30 s |
| Maximale reactietijd | 1,50 s |
| Initiële snelheid van voertuigen | 100 km/u |
| Vrije ruimte bij betreden netwerk | 10 m |
| Snelheid gekoppeld aan agressie | ja |
| Gravitatieconstante | 9,81 m/s ² |

Tabel C.9: Algemene simulatieparameters.

| Parameter | Waarde |
|-------------------------------------|--------|
| Ondergrens voor tussenruimte | 0,50 m |
| Excess voor ondergrens tussenruimte | 1,00 m |
| Ondergrens voor tussentijd | 0,10 s |
| Excess voor ondergrens tussentijd | 0,50 s |
| Bovengrens voor tussentijd | 0,70 s |
| Excess voor bovengrens tussentijd | 1,00 s |

Tabel C.10: Parameters voor het voertuig-volg model.

| Toestand | α | β | γ |
|------------|----------|---------|----------|
| versnellen | 2,15 | -1,67 | 0,89 |
| vertragen | 1,55 | 1,08 | 1,20 |

Tabel C.11: Parameters voor het voertuig-volg regime.

| Parameter | Waarde |
|---|--------|
| Kritiek punt | 0,85 |
| Macht bij kansberekening MLC | 3 |
| Ondergrens voor opening vooraan | 0,50 m |
| Excess voor ondergrens voor opening vooraan | 0,50 m |
| Ondergrens voor opening achteraan | 0,50 m |
| Excess voor ondergrens voor opening achteraan | 0,75 m |

Tabel C.12: Parameters voor het vak-verander model.

Appendix D

Mitrasim 2000

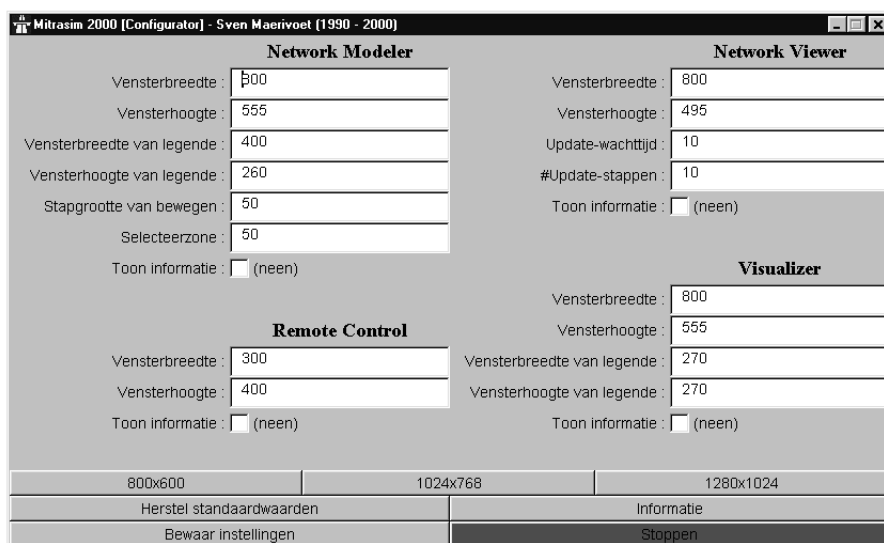
Mitrasim 2000 is een verzameling programma's die toelaten om experimenten in verband met microscopische verkeerssimulatie op te zetten en uit te voeren. Alle software is geschreven met behulp van Sun's *Java Development Kit* (JDK) versie 1.2.2, wat toelaat om platformonafhankelijk te werken (met uitzondering van *React* wat geschreven is in Turbo Pascal 7.0 en onder MS-DOS draait). Volgende programma's worden kort toegelicht :

- *Configurator*,
- *Network Modeler*,
- *Network Viewer*,
- *Mitrasim*,
- *Remote Control*,
- *Visualizer*
- en *React*.

Merk op dat alle programma's (met uitzondering van *React*) meertalig zijn wat betreft hun gebruikersomgevingen. Op dit moment worden enkel Nederlands en Engels ondersteund. Een uitbreiding naar een andere taal is eenvoudig : men dient enkel in het taal-initialisatiebestand alle zinnen te vertalen naar de nieuwe taal.

D.1 Configurator

Configurator is een programma waarmee snel de algemene instellingen van de andere programma's gewijzigd kunnen worden. De grafische programma's weten zelf niet welke grafische resolutie er gebruikt wordt. Daarom wordt voor elk programma opgegeven wat de grootte van het venster is waarin het draait, alsmede enkele andere parameters. Er zijn standaardwaarden voorzien die volgende grafische resoluties omvatten : 800x600 pixels, 1024x768 pixels en 1280x1024 pixels. Figuur D.1 geeft weer hoe *Configurator* er na opstarten uitziet.

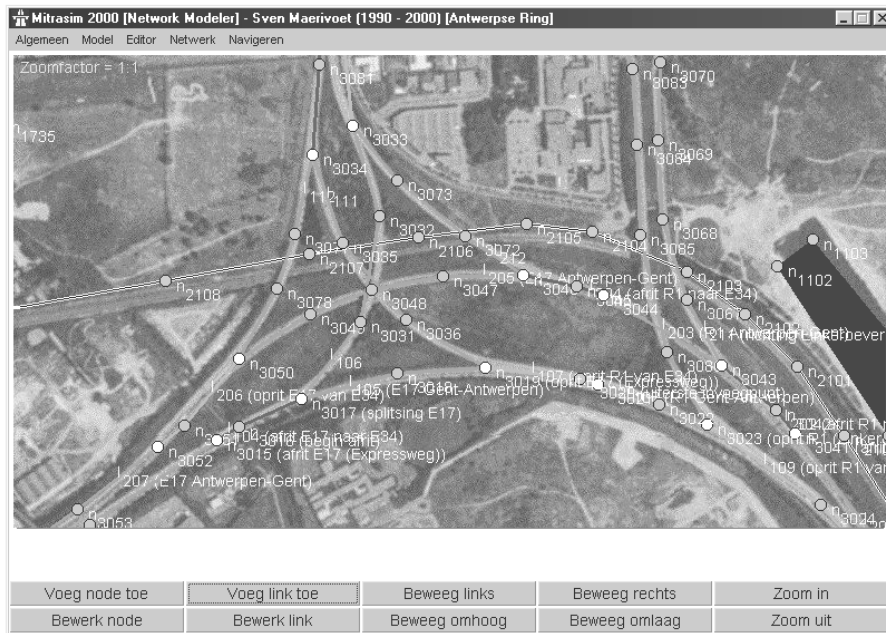


Figuur D.1: Het overzichtsscherm van *Configurator*.

D.2 Network Modeler

Aangezien de drie-dimensionale wereld in een gewoon tekstbestand wordt gedefinieerd is het mogelijk om deze volledig met de hand in te geven. Dit is echter een zeer intensief en tijdrovend werkt wat bovendien zeer veel fouten introduceert. Om aan dit euvel te verhelpen werd *Network Modeler* ontwikkeld die het hele proces vereenvoudigt tot het aanklikken van punten op het scherm. Het grote voordeel is dat nu een foto als achtergrond gebruikt kan worden waarop dan punten aangeduid kunnen worden (nadat een oorsprong en schaal werden gedefinieerd). Er is ook de mogelijkheid voorzien om een netwerk-analyse uit te voeren. Op deze manier kan men de meeste gemaakte fouten (zoals verbindingen die niet aansluiten

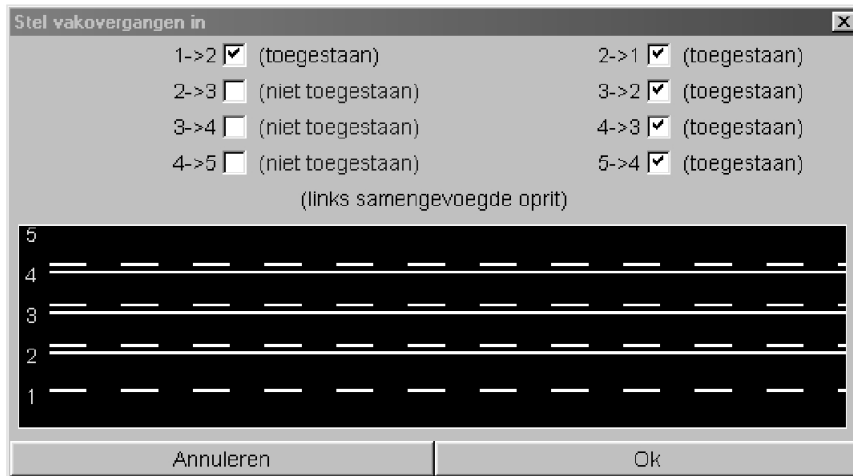
en dergelijke) automatisch zoeken en deze dan zelf elimineren. Figuur D.2 geeft weer hoe het werken met dit programma kan aanvoelen. Als voorbeeld van gebruiksgemak geeft figuur D.3 weer hoe eenvoudig het is om de verkeersregels, met betrekking tot de vakovergangen, aan te passen.



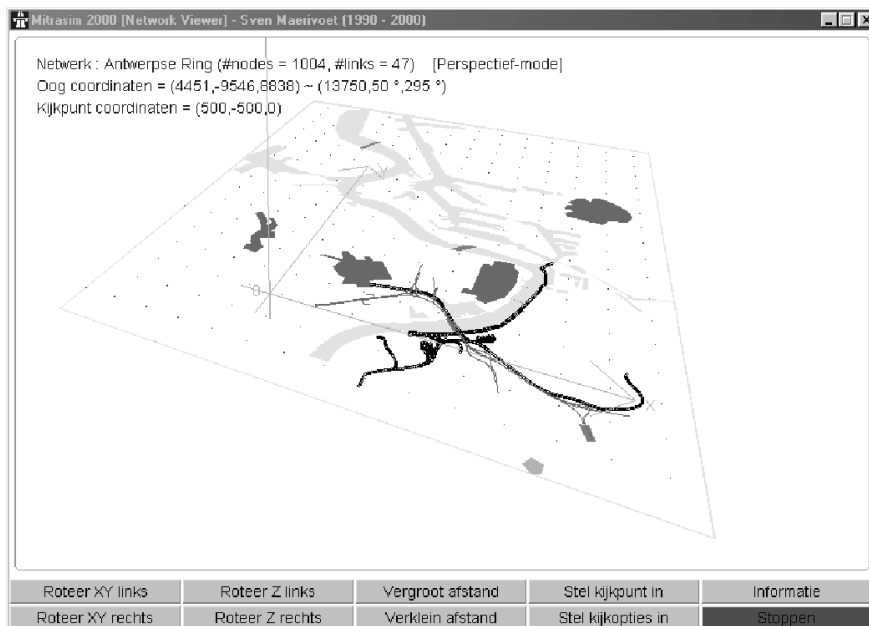
Figuur D.2: Werken met *Network Modeler* aan de Ring (Linkeroever).

D.3 Network Viewer

Met behulp van *Network Viewer* is het mogelijk om een drie-dimensionaal beeld te genereren van het volledige wegennetwerk. Naast de autosnelwegen kunnen ook de omgeving (bestaande uit rivieren, spoorwegen, woonzones, ...), het assenstelsel, een referentierooster en de volumebalk (deze omvat alle objecten in de drie-dimensionale wereld) getoond worden. Het programma leest de weer te geven wereld in van een bestand dat gecontroleerd wordt op fouten. Indien het programma fouten vindt dan worden deze in detail gerapporteerd. Figuur D.4 geeft weer hoe vanuit een willekeurige hoek een beeld kan gegenereerd worden van de omgeving aan de Kennedytunnel.



Figuur D.3: Het aanpassen van al dan niet toegelaten vakovergangen is zeer eenvoudig.



Figuur D.4: Een drie-dimensionaal beeld dat gegenereerd werd met *Network Viewer*.

D.4 Mitrasim

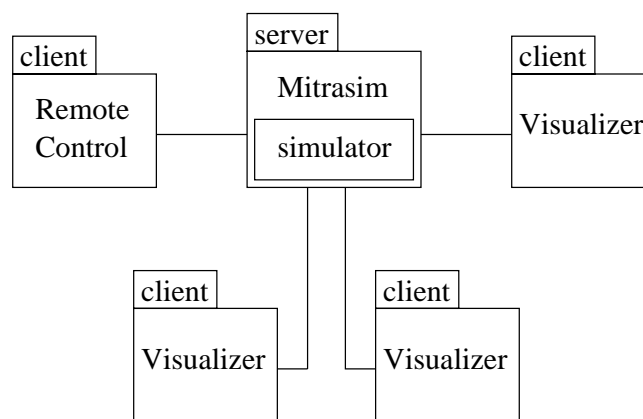
Mitrasim 2000 werd vanuit een welomschreven definitie ontwikkeld : doel was om een programma te hebben dat maar één zaak moest doen, namelijk het simuleren

van voertuigen op autosnelwegen. Dit houdt in dat grafische vormgeving en dergelijke kon losgekoppeld worden van het eigenlijke simuleren zelf. Het resultaat is *Mitrasim*, een programma dat zich in een TCP/IP-computernetwerk¹ als *server* gedraagt en luistert naar een TCP-poort waarna het verbindingen met *clients* kan aanvaarden, weigeren en behandelen. Dit concept van gedistribueerd programmeren brengt een belangrijk voordeel met zich mee : de computer die enkel *Mitrasim* draait, kan zich nu uitsluitend toewijden op het simuleren terwijl andere computers zich kunnen bezig houden met het vergaren van gegevens en het genereren van animatiebeelden.

De algemene opzet is om één computer in een TCP/IP-netwerk als *server* aan te duiden (die dan *Mitrasim* draait) en andere computers in dit netwerk als *clients* te behandelen. Vermits het programma *Mitrasim* zelf geen gebruikersomgeving voorziet, dient deze met behulp van een afstandsbediening aangestuurd te worden (zie paragraaf D.5 voor meer details hieromtrent).

Mitrasim geeft enkel de meest rudimentaire uitvoer op het beeldscherm weer, namelijk een beschrijving van de opdrachten die het programma ontvangt van en verstuurd naar de *clients* in het TCP/IP-netwerk. Om effectief geanimeerde beelden te zien en gegevens op te vragen is er het programma *Visualizer* voorhanden.

Figuur D.5 geeft een overzicht van hoe het werken met de client/server-structuur er praktisch gezien uitziet.



Figuur D.5: Het werken in een client/server-omgeving.

Merk op dat het ook mogelijk is om alle programma's om één en dezelfde computer te draaien. Men verliest dan wel een belangrijke troef : de rekenkracht wordt nu niet meer verdeeld over verschillende computers.

¹TCP staat voor Transfer Control Protocol en IP staat voor Internet Protocol. Beiden worden goed ondersteund door de Java programmeertaal.

D.5 Remote Control

Met behulp van de afstandsbediening, *Remote Control*, is het mogelijk om *Mitrasim* vanop afstand te besturen. Indien men een simulatie wil uitvoeren dan dient er een scenario beschikbaar te zijn. Dit scenario bevat alle parameters voor de simulator en een beschrijving van het te gebruiken wegennetwerk. Vervolgens wordt dit door de afstandsbediening ingelezen, nagekeken en doorgestuurd naar *Mitrasim*. Vervolgens kan dan de simulator gestart worden. Figuur D.6 toont hoe de afstandsbediening eruit ziet.



Figuur D.6: Het besturen van de simulator gebeurt met *Remote Control*.

Merk op : er mag slechts één afstandsbediening terzelfdertijd gebruikt worden, *Mitrasim* kijkt dit na zodat er geen conflicten kunnen optreden. De reden hiervoor is beveiliging : *Mitrasim* werkt op een TCP/IP-netwerk en het is dus mogelijk om vanop een andere computer een verbinding met de server aan te gaan en deze laatste dan in de war te sturen terwijl er bijvoorbeeld juist een simulatie draaiende is waarvan de resultaten bewaard worden.

D.6 Visualizer

Naast de afstandsbediening is er nog een tweede type *client*, namelijk *Visualizer*. Dit programma (waarvan er meerdere terzelfdertijd mogen draaien) geeft de mogelijkheid om beelden te tonen die het simulatieproces animeren : telkens wordt er een aanvraag naar *Mitrasim* gestuurd, deze laatste stuurt dan de nodige informatie (posities van voertuigen en dergelijke) terug zodat *Visualizer* een driedimensionaal beeld kan genereren van de toestand in het wegennetwerk. Daarenboven is het ook nog eens mogelijk om de informatie vergaard door de lusedetectoren weer te geven en deze naar een bestand weg te schrijven zodat een logboek kan worden bijgehouden van de simulatie. Dit laatste kan dan geanalyseerd worden om uitspraken over bepaalde hypothesen te doen.

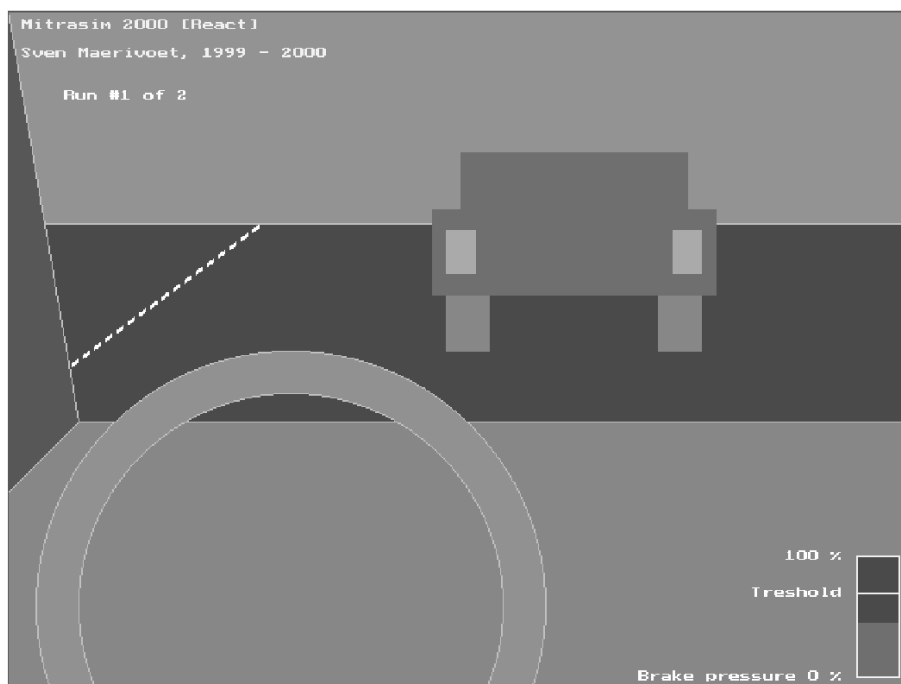
Een mogelijk beeld dat kan gegenereerd worden is te zien in figuur D.7, het stelt de grote driehoek van autosnelwegen te Linkeroever voor.



Figuur D.7: Een drie-dimensionaal animatiebeeld gegenereerd door *Visualizer*.

D.7 React

Zoals in paragraaf 7.1.1 reeds vermeld, wordt *React* gebruikt om de reactietijden van bestuurders te meten. Dit programma (Engelstalig) is geschreven in Turbo Pascal 7.0 en gebruikt een grafische resolutie van 640x480 pixels in 16 kleuren. Het programma vraagt om bij het opstarten de aangesloten joystick (dit zijn normaal gezien rem- en gaspedalen met stuur maar het kan ook een gewone joystick zijn) te kalibreren. Er wordt gebruik gemaakt van BIOS-interrupt aanroepen om de stand van de joystick te lezen. Het programma geeft dan de mogelijkheid om een aantal experimenten na elkaar uit te voeren waarna alle gemeten waarden, het steekproefgemiddelde en de steekproefvariantie (en standaardafwijking) worden weergegeven. Figuur D.8 toont het beeld dat de proefpersoon ziet op het beeldscherm van de computer waar *React* op draait.



Figuur D.8: Het meten van reactietijden met *React*.

Bibliografie

- [Ada36] W. F. Adams. *Road Traffic Considered as a Random Series*, pagina's 121–130. J. Inst. Civil Engineers, 1936.
- [Ahm99] Kazi Ifthekar Ahmed. *Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior*. Doctoraatsthesis, Massachusetts Institute of Technology, februari 1999.
- [Ath65] P. Athol. *Interdependence of Certain Operational Characteristics Within a Moving Traffic Stream*. *Highway Research Record*, (72):58–87, 1965.
- [Bov00] Christophe Boval. Ring voltooid, maar werk niet af. *De Standaard*, pagina 31, 12 april 2000. Krantenartikel.
- [CHC98] Alan Chachich, Masroor Hasan, en David Cuneo. *Extraction of Driver Behavior Information from Traffic Video to Support Microscopic Traffic Simulation*. Technisch Rapport NE20-208, Massachusetts Institute of Technology Intelligent Transportation System Program, 1998.
- [Cop99] Marc Coppens. Verkeersdrukke op Vlaamse wegen. *Het Nieuwsblad*, pagina 1, 3 december 1999. Krantenartikel.
- [CWM94] Gordon Cameron, Brian J.N. Wylie, en David McArthur. *PARAMICS - Moving Vehicles on the Connection Machine*. Technisch rapport, Edinburgh Parallel Computing Centre (EPCC), 1994.
- [DCM94] Gordon Duncan, Gordon Cameron, en David McArthur. *PARAMICS-MP : Final Report*. Technisch rapport, Edinburgh Parallel Computing Centre (EPCC), 1994.
- [Die95] Michael Diefenthaler. De Programmeerbare Interval Timer (PIT). Uit *PC Underground*, hoofdstuk 12, pagina's 391–398. Easy Computing, 1995.

- [FvDFH90] James Foley, Andries van Dam, Steven Feiner, en John Hughes. Representing Curves and Surfaces. Uit *Computer Graphics Principles and Practice*, hoofdstuk 11, pagina's 471–532. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2e editie, 1990.
- [Hae80] C.B. Van Haeringen. *Kramers' Nederlands Woordenboek*, pagina 857. Elsevier Amsterdam/Brussel, 19e editie, 1980.
- [Hal96] Fred L. Hall. Traffic Stream Characteristics. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.
- [Has99] Masroor Hasan. *Evaluation of Ramp Control Algorithms using A Microscopic Traffic Simulation Laboratory, MITSIM*. Doctoraatsthesis, Massachusetts Institute of Technology, februari 1999.
- [Ker99] B. Kerner. Talking about traffic congestion. . . . Uit *Noorderlicht : De automobilist als deeltje*. Nederland 3 Televisiezender, 9 november 1999.
- [KM96] Reinhart Kuhne en Panos Michalopoulos. Continuum Flow Models. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.
- [Kop96] Rodger J. Koppa. Human Factors. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.
- [Kou99a] Haris N. Koutsopoulos. Examples of Simulation Models : DynaMIT Supply Simulator and MITSIM. Uit *Traffic Performance Models*, nummer 2. Massachusetts Institute of Technology, augustus 1999.
- [Kou99b] Haris N. Koutsopoulos. Fundamentals of Microscopic and Macroscopic Traffic Flow Theory and Performance Models. Uit *Traffic Performance Models*, nummer 1. Massachusetts Institute of Technology, augustus 1999.
- [Low94] Rob Lowen. *Analyse I*. RUCA - Universitair Centrum Antwerpen, 1994.
- [LR96] Edward Lieberman en Ajay K. Rathi. Traffic Simulation. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.

- [LW55] M. Lighthill en G. Whitham. On Kinematic Waves-II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Uit *Royal Society Proceedings*, nummer 1178, pagina's 317–345, London, 1955.
- [MIT98] Massachusetts Institute of Technology. *DynaMIT : Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travelers*, april 1998. Webextract, MIT ITS Projects.
- [Pur99] Matti Pursula. Simulation of Traffic Systems - An Overview. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 3(1):1–8, 1999.
- [RK57] C. A. Rothrock en L. A. Keefer. Measurement of Urban Traffic Congestion. *Highway Research Board Bulletin*, (156):1–13, 1957.
- [Rot96] Richard W. Rothery. Car Following Models. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.
- [Rou94] P. Rousseeuw. *Elementen van kanstheorie en statistiek*. Universitaire Instelling Antwerpen, september 1994.
- [TB96] Rod J. Troutbeck en Werner Brilon. Unsignalized Intersection Theory. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.
- [UF99] University of Florida. *CORSIM - FHWA's Microscopic Corridor Traffic Simulation*, 1999. Webextract, Computer Simulation of Real-World Traffic Conditions.
- [VTC96] Virginia Tech Center for Transportation Research. *The Smart Road - General Information*, 1996. Webextract.
- [VWV00] Nico Vandaele, Tom Van Woensel, en Aviel Verbruggen. A queueing based traffic flow model. *Transportation Research Part D*, 5(2):121–135, februari 2000.
- [WC54] J. G. Wardrop en G. Charlesworth. A Method of Estimating Speed and Flow of Traffic from a Moving Vehicle. Uit *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, deel 3 van II, pagina's 158–171, 1954.
- [WCV00] Tom Van Woensel, Ruth Creten, en Nico Vandaele. *Estimating Traffic Flow Emissions*. Ongepubliceerd artikel, Universiteit Antwerpen, UFSIA, Faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen, 2000.

- [Wil96] James C. Williams. Macroscopic Flow Models. Uit *Traffic Flow Theory : A State-of-the-Art Report*. Transportation Research Board, 2e editie, 1996.
- [WV00] Tom Van Woensel en Nico Vandaele. *TRAQ : Traffic Flow Analysis and Queueing Theory : An Integrated Approach*. Ongepubliceerd artikel, Universiteit Antwerpen, UFSIA, Faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen, maart 2000.
- [Yan97] Qi Yang. *A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems*. Doctoraatsthesis, Massachusetts Institute of Technology, juni 1997.

Index

- A10, 89
- A12, 100
- aankomsttijd, 42
 - verwachte aankomsttijd, 48–50
- Advanced Traffic Management System, 87, 177
- Advanced Traveler Information System, 88, 177
- afleiding, 61
- afrit, 25, 72, 74, 82, 93, 99, 100, 110, 113, 122, 123, 125, 139, 146, 172
- AIMSUN, 82
- Antwerp Ring, 98, 99, 139, 150, 155, 166, 169, 172
- asynchroon, 79
- ATIS, 88, 177
- ATMS, 87, 177
- autosnelweg, 5–8, 24, 25, 27–30, 32, 34, 39, 56, 60, 70, 72, 73, 80, 84, 90, 93, 96, 98–100, 105, 107, 113, 140, 146, 148, 155, 174, 192, 194, 196
 - geautomatiseerde autosnelweg, 70
- bedieningsstation, 47–51
- bedieningstempo, 48
- bedieningstijd, 48–50
 - variatiecoëfficiënt van de bedieningstijd, 49, 50
 - verwachte bedieningstijd, 48–50
- beeldherkenning, 13
- behoud van doorstroming, 34, 41
- bestuurder-voertuig-rijbaan systeem, 63
- bestuurdersgedrag, 3, 54, 93, 98
- bewegingstijd, 57, 65, 110
- bezetting, 9, 11, 12, 19–22, 31, 33, 179
- BISON++, 88
- botsing, 7, 63, 64, 68, 69
- botsingstijd, 65
- bottleneck, 27, 39
- camera, 11, 25
- capaciteit, 24, 29, 30, 43, 63, 78, 86
 - baancapaciteit, 1, 31, 37
 - maximale capaciteit, 128
- car-following model, 2, 31, 54, 62
- catastrofe, 32
 - catastrofe-theorie, 31–33
- centraal systeem, 14
- chaos, 95
 - chaos-theorie, 95
- complexiteit, 58
- computersimulatie, 2, 103–105
- concentratie, 9, 15, 21, 22, 30–35, 42, 44, 152, 178
 - concentratie-meting, 21
 - voertuigconcentratie, 44
- continuïteitsvergelijking, 36, 39, 81
 - algemene continuïteitsvergelijking, 36
- continuity equation, 36
- CONTRAM, 82
- controle, 55
- controle-variabele, 32

correlatie, 8
 Corridor Simulation, 177
 CORSIM, 72, 177
 Craeybeckstunnel, 2, 100, 142

 deelstroom, 18, 178, 179
 dichtheid, 9, 11–14, 18–27, 29–37, 39–41, 47–49, 52, 66, 67, 69, 80, 81, 84–87, 89, 93, 128, 130, 149, 151, 152, 156–158, 160, 161, 163–166, 168, 178, 179
 dichtheid van een kruispunt, 44
 gemiddelde dichtheid, 179
 kritieke dichtheid, 24, 39, 40
 maximale dichtheid, 84
 opstopingsdichtheid, 24, 27, 29, 30, 32, 47–49, 67
 totale dichtheid, 179
 verkeersdichtheid, 40
 wegendichtheid, 44
 discretionary lanechange, 72, 177
 DLC, 72, 73, 89, 121, 123, 125, 129, 148, 177
 doorstromingsgraad, 8, 11–15, 19, 21–29, 31–34, 36, 37, 40–42, 47, 51, 52, 67, 69, 78, 80, 84, 85, 93, 97–99, 103, 104, 106, 125, 126, 128–130, 133, 140–144, 146, 149, 150, 156, 158, 160, 161, 164, 166, 168, 172, 173, 178
 maximale doorstromingsgraad, 31, 32, 48, 49, 51, 84
 DTA, 86, 177
 dynamic traffic assignment, 86, 177
 dynamische verkeersstoeuwijzing, 86
 DynaMIT, 82, 83, 85, 86, 177
 DYNASMART, 82

 E17, 98, 99, 160, 164
 E19, 51, 100

 E34, 158, 164
 E40, 84
 effectiviteitsmetingen, 78
 empirisch stroommodel
 doorstromingsgraad-concentratie model, 30, 31, 152
 drie-dimensionale model, 31
 snelheid-concentratie model, 29, 31
 snelheid-dichtheid model, 29, 151
 snelheid-doorstromingsgraad model, 25, 28–30, 150
 Expressweg, 98
 extrapolatie, 58

 Federal Highway Administration, 72, 177
 FHWA, 72, 177
 file, 75, 93, 104, 169
 fileproblematiek, 2, 25, 92, 93, 95, 174
 filevorming, 1, 5, 23, 31
 oorzaken van filevorming, 23
 flessenhals, 39, 168
 FLEX, 88
 flow rate, 8, 15
 FOSIM, 82
 FREESIM, 72, 177
 Freeway Simulation, 177
 FREFLO, 81
 FREQ, 81
 FRESIM, 82
 frontale gezichtsveld, 59
 fundamentele vergelijking, 3, 21, 25, 27, 29, 130, 178

 gap acceptance behaviour, 71
 gaspedaal, 56, 108, 109, 134
 gebeurtenis-gedreven, 79, 80
 General Motors, 2, 70, 177
 generatiegraad, 36
 gerichte graf, 111, 112, 139

gevoeligheid, 65–67, 89, 116
 GM, 2, 177
 golf, 37, 39
 golfpropagatie, 41
 start- en stopgolven, 39

 harmonisch gemiddelde, 18
 HCM, 15, 86, 177
 Highway Capacity Manual, 15, 27, 28, 177
 HUTSIM, 82

 incident, 81
 INTEGRATION, 82
 Intelligente Transport Systemen, 1, 14, 29, 47, 56, 90, 103, 104, 108, 174, 175, 177
 ITS, 1, 174, 175, 177

 jam density, 24, 27, 29, 30
 JDK, 127, 155, 190

 kalibratie, 62, 105, 146, 148, 149, 153, 173
 kanstheorie, 1
 kansverdeling, 41
 karakteristiek, 37, 39
 Kennedytunnel, 2, 99, 100, 141, 150, 166, 168, 192
 kinematische gastheorie, 39
 klok-gedreven, 79, 80, 106, 128
 knelpunt, 27
 KRONOS, 81

 lane-change model, 55, 71
 leiding, 55
 looming, 58
 luchtfoto, 18, 139

 macroscopisch stroommodel
 algemeen netwerkmodel, 43
 α -relatie, 43
 twee-stromen theorie, 44

 performantie van een verkeerssysteem, 42
 reistijd model, 43
 macroscopische simulator, 79–81, 83, 106
 mandatory lanechange, 72, 177
 Measure of Effectiveness, 78, 177
 MEET, 85
 meettechniek, 3, 8–10, 22, 25, 171
 meting in een punt, 9, 10
 meting met behulp van externe communicatie, 9, 10
 meting over een deel van de rijbaan, 9, 12
 meting over een groot deel van de rijbaan, 12
 meting over een klein deel van de rijbaan, 12
 meting uitgevoerd door een bewegende waarnemer, 9, 13
 puntmeting, 11–13, 15, 21
 menselijke factor, 54, 55, 61, 62, 75, 109, 110, 113
 Mesoscopic Traffic Simulator, 88
 mesoscopische simulator, 79, 81–83, 85, 88
 MesoTS, 88
 METACOR, 81
 METROPOLIS, 82
 Microscopic Traffic Simulator, 87, 177
 microscopisch stroommodel, 54
 microscopische simulator, 79, 82, 83, 88, 90, 106, 126, 131, 172
 microscopische verkeerssimulator, 2, 3, 62, 68, 72, 127, 175
 MICROSIM, 82
 middenvakrijder, 113, 114, 124, 126, 163–165, 169, 172
 MITRASIM, 177
 Mitrasim, 195

Mitrasim 2000, 2, 3, 62, 102, 105,
 111, 113, 133, 134, 139, 190,
 193
 Mitrasim v1.0, 107
 MITSIM, 68, 69, 72, 76, 82, 83, 87–
 90, 106, 121, 177
 MLC, 72, 73, 82, 89, 110, 121–124,
 129, 148, 177
 MOE, 78, 177
 movement time, 177
 MT, 134, 177

 N49, 98
 navigatie, 55, 56
 NETCELL, 81
 NETSIM, 72, 82, 177
 NETVAC, 81
 netwerk-topologie, 42
 netwerkperformantie, 43
 Network Modeler, 139
 Network Simulation, 177
 noodtoestand regime, 68, 117, 120
 nTRAQ, 81, 85

 occupancy, 19
 ongeval, 23
 opdoeming, 58
 opening-aanvaardingsgedrag, 71, 73
 oprit, 25, 73, 82, 88, 93, 99, 100, 113,
 122, 123, 125, 139, 157, 158,
 160, 164, 172
 opstopping, 2, 5, 24, 26, 31, 37, 40,
 48, 60, 78, 82, 86–88, 90, 99,
 113, 156, 160, 164
 artificiële opstopping, 61

 PARAMICS, 82
 pedaal, 65
 perception reaction time, 177
 perifere gezichtsveld, 59
 PRT, 134, 177

 R1, 85, 98–100
 radarpistool, 16
 radiale beweging, 58
 random number generator, 80, 177
 React, 134
 reactie op andere voertuigen, 58
 reactietijd, 39, 56, 58, 60, 61, 63, 65,
 67, 69, 70, 79, 89, 107, 110,
 113, 116, 121, 126, 133–138,
 144, 149, 197
 bewegingstijd, 134
 gemiddelde waarnemingsreactie-
 tijd, 56
 minimale reactietijd, 56
 minimale reactietijd vertraging, 57
 waarnemingsreactietijd, 56, 57, 65,
 110, 134
 reis-vraag-niveau, 42
 reistijd, 9, 13, 14, 17, 42, 43, 46, 78,
 86, 103, 104
 gemiddelde minimale reistijd, 45,
 47
 gemiddelde reistijd, 14, 18, 43,
 45
 minimale reistijd, 82
 reistijd-contour, 43
 rekenkundig gemiddelde, 17
 rempedaal, 56, 69, 70, 134
 remperformantie, 61
 respons, 64, 65, 116, 130
 rijbaan, 9, 10, 47, 66, 70, 71, 96, 104,
 107–109, 113, 115, 123–125,
 140, 147, 157, 163, 166
 rijbekwaamheid, 64
 rijgedrag, 7
 rijstrook, 5
 RNG, 80, 82, 137, 177

 satellietfoto, 139, 140
 Schelde, 99, 100, 140
 schokgolf, 31, 37, 39, 41

snelheid van een schokgolf, 37
 SIMLAB, 87, 88, 106, 177
 Simulation Laboratory, 87, 177
 SMS, 17–19, 44, 177, 178
 snelheid, 5–8, 11–23, 25–27, 29–34, 37, 39, 40, 42, 43, 47–49, 52, 56, 58–60, 63–70, 72, 74, 76, 80, 84, 86, 87, 89, 93, 96, 103, 108, 109, 114–121, 123, 126, 128–130, 147, 150, 160, 178, 179
 gemiddelde maximale voortbewegingsnelheid, 45
 gemiddelde relatieve snelheid, 64
 gemiddelde snelheid, 6, 16, 18, 27, 45, 78, 128, 130, 141, 142, 148, 149, 151, 156, 158, 160, 161, 163–166, 168, 169, 172, 179
 gewenste snelheid, 68, 69, 72, 109, 114, 117, 118, 121, 126, 129
 golfsnelheid, 37
 maximale snelheid, 114, 127
 minimum snelheid, 87
 nominale snelheid, 48, 49, 84
 ogenblikkelijke snelheid, 16
 relatieve snelheid, 59, 64, 65, 67, 74, 87
 snelheid uitgemiddeld in de ruimte, 17, 44, 178, 179
 snelheid uitgemiddeld in de tijd, 17
 snelheid van een schokgolf, 37
 snelheidsbeperking, 25, 61, 108–110, 113, 114, 126, 155, 157, 168, 172
 snelheidsklasse, 40
 snelheidsmeting, 16
 snelheidsverandering, 59
 snelheidsverschil, 74, 118, 119
 stroomsnelheid, 37, 67
 verdeling van snelheden, 40
 space mean speed, 17, 177
 statistische verdelingen, 15
 stimulus, 64–67, 89, 116, 130
 stimulus-respons relatie, 64
 stochastische veranderlijken, 15
 stroommodel, 54
 stroommodel, 23, 25, 42, 47, 51, 52, 54
 continu stroommodel, 23, 34, 41, 47, 52, 80
 eerste orde continu stroommodel, 39, 41
 empirisch stroommodel, 25, 33, 41, 47, 52, 53, 150
 hoger orde continu stroommodel, 39–41
 macroscopisch stroommodel, 23, 41, 42, 47, 52, 80
 stochastisch continu stroommodel, 40, 41
 stroommodel gebaseerd op wachtrijtheorie, 23, 47, 51, 52, 80
 stroommodel gebaseerd op wachtrijtheorie
 G/G/1 wachtrij-model, 50
 M/G/1 wachtrij-model, 49
 M/M/1 wachtrij-model, 48
 toestandsafhankelijk G/G/1 wachtrijmodel, 51
 stuurvermogen, 61
 synchroon, 79
 TerraServer, 139
 terugkoppeling, 65
 The Smart Road, 105
 THOREAU, 82
 tijd-ruimte diagram, 9, 11–13, 17, 18
 time mean speed, 17, 177
 TMS, 17–19, 88, 177
 toestandsvariabele, 32

Traffic Flow Analysis and Queueing Theory, 83, 177
 Traffic Management Simulator, 88
 traject, 9
 trajectlijn, 10, 13, 16
 TRAQ, 83, 84, 177
 travel demand level, 42
 tunnel, 93, 108, 109
 tunneleffect, 108, 109, 115, 140, 148, 156, 160
 tussenruimte, 9, 63–69, 75, 116–121, 124, 130, 179
 gemiddelde tussenruimte, 62, 63
 tussentijd, 9, 11–13, 15, 20, 30, 71, 75, 89, 116, 117, 121, 125, 126, 130, 150
 aankomst-tussentijd, 48–50
 gemiddelde tussentijd, 15
 variatiecoëfficiënt van de aankomst-tussentijd, 50
 verdeling van de tussentijden, 40
 twee-stromen model, 46
 vak-verander model, 55, 62, 71, 72, 75, 76, 82, 89, 90, 106, 116, 121, 124, 127, 129, 147, 149, 173, 175
 veldtest, 103–105
 verbreding, 113
 verkeer, 3, 5–7, 9, 10, 17, 24, 25, 27, 31, 34, 36, 37, 44, 51, 55, 67, 70, 73, 75, 84, 89, 90, 94, 98, 107, 115, 125, 156, 158–161, 163, 169, 172
 éénvaksverkeer, 69
 gesynchroniseerd verkeer, 6, 76
 opgestopt verkeer, 6, 18, 19, 24, 26, 31, 32, 39, 68, 76, 96, 98, 125, 138, 147, 148, 150, 166, 172
 opgestopte verkeer, 157
 stadsverkeer, 72
 vrij verkeer, 5, 18, 19, 24, 26, 27, 29, 31, 32, 37, 67, 68, 75, 76, 87, 96, 108, 113
 zwaar verkeer, 72
 verkeersbeheer, 1, 78, 90
 verkeersconditie, 42, 46
 verkeerscontrolesysteem, 42
 verkeersdrukke, 5, 6, 15, 24, 26, 29
 verkeersintensiteit, 43, 48
 verkeerslicht, 24, 42, 58, 72, 80, 88, 175
 tijdsregeling van een verkeerslicht, 41
 verkeersmassa, 39
 verkeersopstopping, 1
 verkeersproblematiek, 1
 verkeersreglement, 113
 verkeersservice, 44
 verkeerssimulatie, 2, 92, 94, 95
 verkeersstroom, 1–3, 5–8, 13–15, 21–24, 27, 29, 31, 34, 36, 39–42, 44, 47, 49, 52–54, 58, 59, 61–63, 67, 69, 71, 74–78, 80, 82, 83, 85, 89, 94, 95, 102–104, 114, 124, 147, 148, 153, 155, 165, 169, 171–174, 178, 179
 golfkarakter van een verkeersstroom, 41
 karakteristieken van een verkeersstroom, 3, 7, 9, 15, 22, 23
 model van een verkeersstroom, 23
 ononderbroken verkeersstroom, 8, 25
 ruiskarakter van een verkeersstroom, 40
 verkeersstroomdeskundigen, 27, 30
 wet van het behoud van een verkeersstroom, 36

verkeerssysteem, 42
 verkeersvolume, 40
 verschillen in performantie van bestuurders, 59
 versmalling, 113
 versnelling, 40, 58, 59, 63–66, 68, 69, 76, 89, 109, 116, 118–121, 129, 130, 140, 148, 161
 maximale versnelling, 115
 maximale versnelling, 68, 69, 115, 118, 127
 verdeling van versnellingsruis, 40
 versnellingscontrole, 61
 versnellingsgedrag, 62
 versnellingsruis, 40
 vertraging, 69, 120
 maximale vertraging, 116, 127
 normale vertraging, 69, 115, 118, 127
 vertrektijd, 42
 viscositeit, 40
 viscositeitsterm, 40
 visuele hoek, 58
 vloeistof, 34, 52, 82
 samendrukbare vloeistof, 34
 vloeistofdynamica, 33, 41
 vloeistofmodel, 2
 vloeistofstroom, 36
 voertuig-volg model, 2, 31, 54, 55, 62–66, 68–70, 75, 82, 89, 106, 116, 118, 120, 127, 129, 130, 147, 149, 173, 175
 automatisch voertuig-volg model, 70
 voertuig-volg regime, 68, 117–119, 161
 voertuigemissies, 78, 84, 85
 voertuiglengte, 63
 voertuigperformantie, 64
 voertuigtelling, 10–13, 84, 96, 99, 103, 139, 141–144, 146, 149, 173
 volgafstand, 116
 voortstuwende vergelijking, 39, 40
 vrij-stromend regime, 68, 69, 117
 Waaslandtunnel, 109
 wachtrij, 26, 27, 47, 85–87, 106
 wachtrij-model, 48, 84
 wachtrij-theorie, 2, 23, 47, 51, 80, 84, 86
 wegennetwerk, 42–47, 51, 52, 82, 97, 111–114, 116, 125, 127–129, 131, 133, 139, 140, 142, 144, 146, 147, 149, 150, 166, 174, 175, 192, 195, 196
 performantie van een wegennetwerk, 42, 72
 wet van Fitt, 57
 wet van Hick en Hyman, 56, 57
 zichtbaarheid, 57, 58