Het fileprobleem in België : wiskundige modellen, analyse, simulatie, regeling en acties.

Eindverslag

DWTC project MD/01/024 en MD/01/025

september 2001

KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN

SISTA
DEPARTEMENT ELEKTROTECHNIEK
KASTEELPARK ARENBERG 10
B-3001 HEVERLEE
+32/16/32.17.09
www.esat.kuleuven.ac.be/sista/

VERKEER EN INFRASTRUCTUUR
DEPARTEMENT BOUWKUNDE
KASTEELPARK ARENBERG 40
B-3001 HEVERLEE
+32/16/32.16.69
www.kuleuven.ac.be/traffic

Voorwoord

Voor u ligt het eindverslag van het project “Het fileprobleem in België: wiskundige modellen, analyse, simulatie, regeling en acties.” Dit project werd gefinancieerd door de DWTC via de onderzoeksovereenkomsten MD/01/024 en MD/01/025. De twee partners in dit project waren K.U. Leuven, Departement Electrotechniek (ESAT), Signals, Identification, System Theory and Automation (SISTA). en K.U. Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Verkeer en Infrastructuur.

Vooraleer van start te gaan met een overzicht van de wetenschappelijke werkzaamheden houden wij eraan onze dank te betuigen aan de Heer ir. E. Beka, Secretaris Generaal en aan Mevrouw A. Grandjean van de DWTC voor de vlotte samenwerking en de opvolging van dit project. Daarnaast danken wij ook de leden van de gebruikersgroep voor hun interesse in ons onderzoek en hun waardevolle opmerkingen tijdens de gebruikersgroepvergaderingen.

Heverlee, 18 september 2001

Prof. dr. ir. Bart De Moor
Prof. ir. Ben Immers
ir. Tom Bellemans
ir. Steven Logghe

Inhoudstabel

Voorwoord ..... *i*
Inhoudstabel ..... *iii*
Samenvatting ..... *v*

1. Inleiding 1
1.1 Schetsen fileprobleem 1
1.2 Mogelijke manieren om het fileprobleem aan te pakken 1
1.3 Doelstellingen van het project 2
1.4 Aanpak 2
1.5 Rapportage 4

2. Inventarisatie modellen 5
2.1 Inleiding 5
2.2 Wiskundige beschrijving van verkeer 5
2.3 Macroscopische modellen 7
2.3.1. Fundamenteel diagram 7
2.3.2. Het ‘eerste orde’ macroscopisch dynamisch verkeersmodel 9
2.3.3. Analyse van enkele verkeerssituaties 10
2.3.4. Verkeersregimes 12
2.3.5. Hogere orde modellen 15
2.4 Microscopische modellen 15
2.5 Keuzeopties in het project 16

3. Inventarisatie verkeerssituaties 17
3.1 Beschrijving proefstrook 17
3.2 Dataverwerking 18
3.2.1 Data acquisitie 19
3.2.2 Interfacing 20
3.2.3 Voorbewerking van de verkeersgegevens 21
3.2.4 Besluit 24
3.3 Verkeerskundige analyse 24
3.3.1 Meetgegevens 24
3.3.2 Eerste orde analyse 25
3.3.3 Hogere orde effecten 26
3.4 Besluit 29

4. Inventarisatie DVM maatregelen 31
4.1 Inleiding 31
4.2 Overzicht DVM maatregelen 31
4.2.1 Informatiesystemen 31
4.2.2 Snelheidsbeï nvloeding..... 32
4.2.3 Toeritdosering 33
4.2.4 Doelgroepmaatregelen 33
4.2.5 Organisatorische maatregelen 34

4.2.6 Infrastructurele maatregelen 35
4.2.7 Juridische maatregelen 35
4.3 Effecten en kenmerken van DVM maatregelen 36
4.3.1 Effecten 36
4.3.2 Kenmerken 38
4.4 Besluit 39

5. Microscopische modellering van de bestaande verkeerssituatie 41
5.1 Inleiding 41
5.2 Dynamische HB tabellen 41
5.3 Overzicht micromodel 45
5.4 Het gemodelleerde verkeerspatroon 47
5.5 Besluit 51

6. Modelgebaseerde verkeersregeling 53
6.1 Inleiding 53
6.2 Verkeersregeling 54
6.2.1 Sensoren 54
6.2.2 Modellen 55
6.2.3 Actuatoren 55
6.3 Modelgebaseerde regeling 56
6.3.1 Kostfunktie 56
6.3.2 Modelgebaseerde regeling in DVM systemen voor snelwegennetwerken 57
6.4 Stand van zaken en toekomstperspectief 59
6.5 Een praktisch voorbeeld: toeritdosering 60
6.5.1 Beschrijving van de opstelling 60
6.5.2 Kostfunktie 61
6.5.3 Optimalisatieprobleem met beperkingen 62
6.5.4 Experiment 62
6.6 Besluit 64

7. Algemeen besluit 65

Appendix A : Adviesgids software 67
A.1 Overzicht commerciële microscopische modellen 68

Appendix B : Overzicht publicaties 73

Appendix C : Administratieve gegevens 75

Samenvatting

In het DWTC project MD/01/024 en MD/01/025 “Het fileprobleem in België: wiskundige modellen, analyse, simulatie, regeling en acties.” werkten de K.U.Leuven onderzoeksgroepen SISTA en Verkeer en Infrastructuur drie jaar lang samen.

In dit project werden wiskundige modellen bestudeerd om het verkeer op een dynamische manier te simuleren. Hierdoor kunnen dynamisch verkeersmanagement (DVM) maatregelen met dergelijke modellen uitgetest worden en kunnen controle algoritmes omschreven worden.

In eerste instantie werden verschillende dynamische verkeersmodellen geï nventariseerd. Het verkeer wordt er met behulp van een formeel wiskundig kader beschreven. De macroscopische modellen beschrijven het verkeer aan de hand van geaggregeerde grootheden zoals dichtheid, intensiteit en gemiddelde snelheid. In eerste orde modellen wordt het verkeer verondersteld te voldoen aan de stationaire fundamentele diagrammen. Hierdoor kunnen hogere orde effecten, zoals hysteresis en start-en-stop golven niet beschreven worden. Microscopische modellen behandelen de verschillende voertuigen afzonderlijk. Door hun stochastisch karakter vergen ze meer rekenkracht en zijn ze minder doorzichtelijk, maar kunnen ze het verkeer nauwkeuriger beschrijven.

De verkeerssituatie werd grondig onderzocht op een acht kilometer lange sectie op de E17 Gent – Antwerpen. Op deze sectie zijn een groot aantal telcamera’s aanwezig, zodat een vrij goed beeld verkregen kan worden van het dynamisch verkeerspatroon. Eerst wordt de verkeersdata die deze detectoren genereren, grondig verwerkt en gefilterd op fouten. Daarna kunnen deze gegevens verkeerskundig geï nterpreteerd worden. De aanwezigheid van start-en stop golven en de op- en afbouw van de file kwamen hierin mooi naar voor.

De DVM-maatregelen kunnen onderverdeeld worden in verschillende categorieën. Hier wordt een onderscheid gemaakt tussen informatiesystemen, snelheidsbeï nvloeding, toeritdosering, doelgroepmaatregelen, organisatorische, infrastructurele en juridische maatregelen. De mogelijke effecten van deze maatregelen en de kenmerken worden in een overzicht weergegeven.

Tijdens het opzetten van een microscopisch model verdient eerst en vooral de invoer de nodige aandacht. De verkeersvraag wordt in dynamische HB tabellen ingegeven en deze tabellen zijn, in tegenstelling met het klassieke macroscopische prognosemodel, geen tussenresultaat van het model. Daarnaast zijn voldoende gegevens van de huidige verkeerssituatie noodzakelijk om het kalibratie- en validatieproces te voeden. Hiervoor wordt de gevoeligheid van de verschillende parameters en variabelen stuk voor stuk onderzocht en afgesteld. Met een microscopisch model is het mogelijk een filepatroon gedetailleerd te modelleren.

In het duurzaamheidskader van het project werd gekeken naar technieken om te komen tot een optimalere benutting van de bestaande capaciteit van de snelwegen. Concreet pakt men dit aan door op basis van het beleid, dat de na te streven doelen definieert, een kostfunktie op te stellen. Deze kostfunktie is een maat voor de optimaliteit van de huidige of de gesimuleerde toestand. Vervolgens wordt op basis

van de inventarisatie een keuze gemaakt van de te gebruiken dynamische verkeersmanagement systemen. Deze systemen vormen de actuatoren die toelaten in te grijpen op de toestand van het verkeerssysteem. Om te komen tot een optimale toestand wordt gebruik gemaakt van een optimalisatiealgoritme dat de kostfunktie minimaliseert, rekening houdend met de beperkingen opgelegd door het verkeersgedrag zoals beschreven in het verkeersmodel.

Bij de optimalisatie van de kostfunktie dienen enkele opmerkingen gemaakt te worden. De simulatie en het updaten van het dynamisch verkeersmodel tijdens de optimalisatie is aan zeer strikte tijdsbeperkingen onderworpen. Opdat de ontworpen regeling in de praktijk bruikbaar zou zijn dient de optimalisatie real-time en on-line te gebeuren. Daar microsimulatiemodellen zeer rekenintensief zijn, zeker voor grote snelwegennetwerken zoals deze waar wij in dit project in geï nteresseerd zijn, werd ervoor geopteerd om voor de optimalisatiestap macroscopische modellen te gebuiken. Hierbij boeten we in aan nauwkeurigheid maar winnen we aan snelheid. In dit kader is de robuustheid van de regelaars belangrijk. Hoe goed het verkeersmodel ook is, er zal altijd een afwijking zijn van de werkelijke situatie. Bij een goede regelaar schaadt deze afwijking de optimaliteit van de gevonden regelaar niet te zeer.

Opdat een zo optimaal mogelijke verkeerstoestand kan bereikt worden in het snelwegennetwerk dienen verschillende DVM systemen globaal geoptimaliseerd te worden. Dit leidt tot gecoördineerde en geï ntegreerde regeling. Indien de optimalisatie op lokale schaal wordt aangepakt kunnen verschillende lokaal geoptimaliseerde regelaars elkaar tegenwerken. Het is duidelijk dat een globale optimalisatie een model van het gehele netwerk vergt en dat rekencomplexiteit ook hier weer belangrijk is.

Een bijkomende techniek die gebruikt wordt om de rekencomplexiteit toch te beperken en te voorkomen dat verschillende DVM opstellingen elkaar tegenwerken is hiërarchische regeling waarbij een regelaar op hoog niveau directieven doorstuurt naar de regelaars op lager niveau die een lokale optimalisatie uitvoeren. Op deze wijze wordt een afweging gemaakt tussen vereiste rekenkracht (complexiteit van het model) en de optimaliteit van de gevonden oplossing.

In dit project werd als voorbeeld gekeken naar toeritdosering als DVM techniek. De gebruikte kostfunktie is de totale door alle voertuigen in het netwerk gespendeerde tijd over een tijdsinterval. Toepassing van een optimalisatiealgoritme leidt tot een optimale doseerstrategie voor de toerit.

De installatie van dynamische verkeersmanagementsystemen die gecombineerd worden met een modelgebaseerde regelaar kan in vele gevallen een significante verbetering van de verkeersafwikkeling realiseren. Onderwerpen die in dit kader in de toekomst zeker nog verder onderzoek verdienen, zijn het ontwerp en de verdere verfijning van dynamische verkeersmodellen en de definitie van een duurzame kostfunktie als doorslag van het gevoerde beleid.

1. Inleiding

1.1 Schetsen fileprobleem

Door de steeds groeiende vraag naar transport, lijken ingrijpende maatregelen noodzakelijk om de groei van congestie op het Belgische wegennet te voorkomen. Gedurende de ochtend- en avondspits wordt het verzadigingspunt op verschillende snelwegen in België bereikt, wat tot uiting komt in files. Deze files veroorzaken op verschillende manieren hinder aan de gemeenschap.

Congestie veroorzaakt economische kosten.

- Transport wordt duurder. Dit is direct voelbaar in een grotere reistijd en het toenemend benzineverbruik tijdens congestie.
- Op langere termijn kan het minder goed functioneren van het transportsysteem een ontradend effect hebben op nieuwe investeerders.
- Bedrijven die het transportsysteem als verlengde van hun productieproces beschouwen, gekend in het just-in-time principe, verliezen aan betrouwbaarheid. Hierdoor moeten grotere opslagplaatsen gebouwd worden, wat duurder voorraadbeheer met zich meebrengt.

Congestie heeft negatieve implicaties op het sociaal functioneren van de maatschappij.

- Congestie zorgt voor grotere snelheidsverschillen, wat de kans op secundaire ongevallen verhoogt. De veiligheid verslechtert dus door files.
- Congestie veroorzaakt stress bij bestuurders en doet de levenskwaliteit dalen door het tijdsverlies.

Congestie heeft negatieve weerslag op milieu.

- De emissies van voertuigen worden door het nutteloos benzineverbruik verhoogd.
- Door congestie worden op lange termijn activiteiten geherlokaliseerd op voor het milieu niet altijd even gunstige lokaties.

Zoals geïllustreerd, heeft het fileprobleem verschillende negatieve gevolgen en brengt het duurzaam functioneren van de maatschappij in gevaar.

1.2 Mogelijke manieren om verkeersprobleem aan te pakken

Congestie is in wezen een te grote verkeersvraag die op het transportsysteem afgewikkeld dient te worden. Een betere afstemming van verkeersvraag en -aanbod kan congestie verminderen. Volgende strategieën, gekend als de 3 B's, komen hiervoor in aanmerking :

- **B**ouwen
  Het transportsysteem kan uitgebreid worden. Hierbij tracht men de groeiende verkeersvraag te volgen door wegen bij te bouwen. Hierdoor kunnen locale bottleneck situaties geëlimineerd worden en missing links verdwijnen. Ook het aanbieden van extra openbaar vervoer is in principe een verhoging van het verkeersaanbod.

- **B**eprijzen
  Door de werkelijke kost aan te rekenen voor het verkeersaanbod wordt een nieuw evenwicht bereikt tussen vraag en aanbod. Hierdoor komt de verkeersvraag onder controle. Rekeningrijden en kilometerheffing zijn maatregelen die hierbinnen passen. Merk op dat het verkeersaanbod onveranderd blijft en dat een snel wijzigend transportsysteem, bv ten gevolge van een ongeval, hiermee niet aangepakt kan worden.
- **B**enutten
  In dit scenario wordt het transportsysteem efficiënter beheerd. Dit kan door dynamisch in te spelen op de snel veranderende verkeersvraag en het wisselende verkeersaanbod.

In dit project richten we ons op de 'Benutten' strategie. Alle maatregelen die hierbinnen passen zullen we met de term DVM omschrijven. Dynamisch Verkeers Management zal in dit project aan bod komen op het autosnelwegennet, waar het fileprobleem localiseerbaar en beheersbaar is.

Dynamisch verkeersmanagement is snel implementeerbaar en de investeringskost is relatief laag.

1.3 Doelstelling van het project

De doelstelling van dit project is het bestuderen van wiskundige modellen om het verkeer op een dynamische manier te simuleren. Hierdoor kunnen DVM maatregelen met dergelijke modellen uitgetest worden en kunnen controle algoritmes omschreven worden.

Het dynamisch modeleren van verkeer behelst in eerste instantie de studie van de dynamische verkeerssituatie. Verder kunnen ook verschillende modelleringstechnieken tegenover elkaar afgewogen worden.

Vooraleer DVM maatregelen uit te testen, dient eerst een overzicht van mogelijke maatregelen te worden uitgedacht. Daarna kan een maatregel van dichtbij in een gemodelleerde testomgeving uitgewerkt worden.

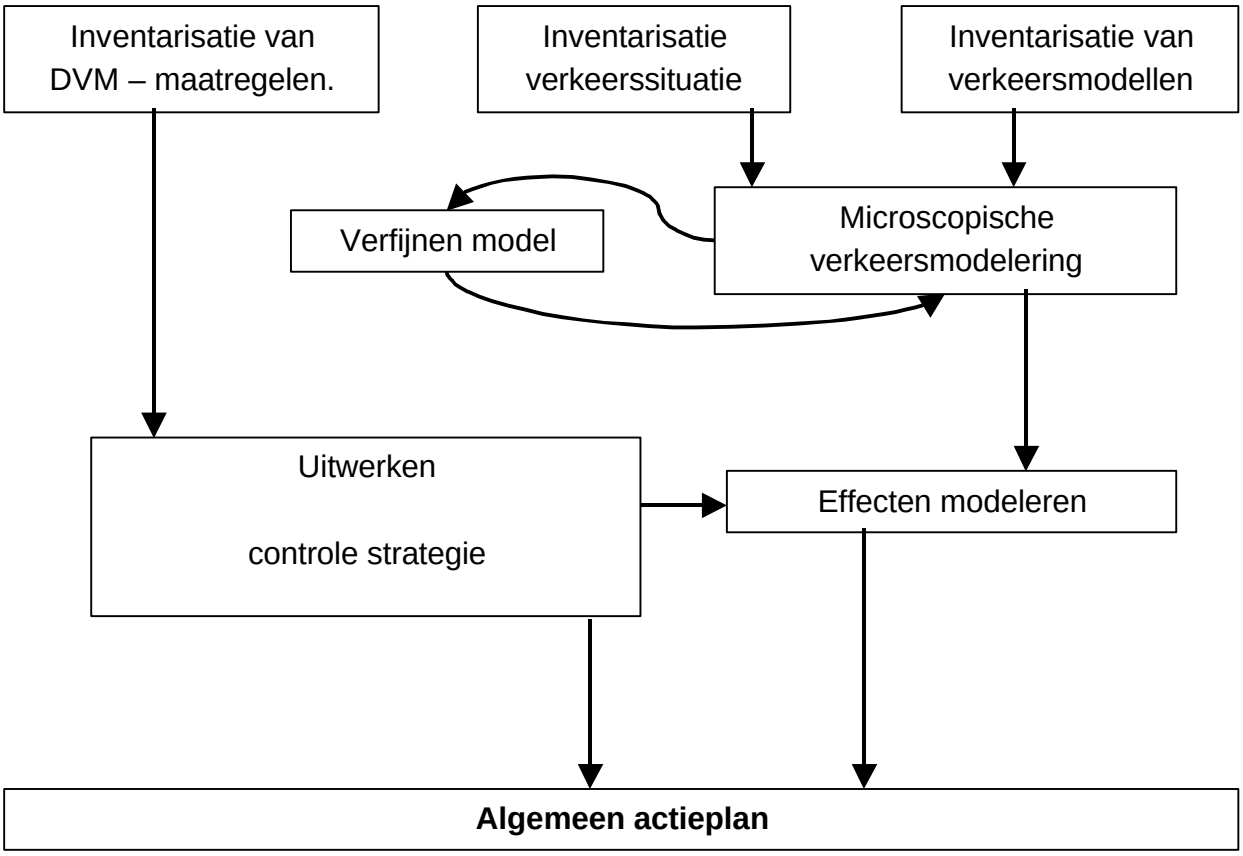
1.4 Aanpak.

In het project wordt het projectschema uit figuur 1.1 aangehouden. Hierbij worden volgende acties omschreven :

- Inventarisatie van DVM – maatregelen
  Er wordt een overzicht opgesteld van alle mogelijke maatregelen die passen binnen de strategie van dynamisch verkeersmanagement. Deze maatregelen worden op mogelijke effecten beoordeeld en de kenmerken ervan worden besproken.

- Inventarisatie verkeerssituatie
  Er wordt geopteerd om een sectie van de E17 Gent – Antwerpen gedetailleerd te

bestuderen. Op deze sectie zijn veel verkeersgegevens beschikbaar en kunnen filepatronen nauwkeurig bekeken worden. Vooraleer een verkeerskundige studie op te maken, moeten de teldata zelf bewerkt worden.



Figuur 1.1: Projectschema.

- Inventarisatie van verkeermodellen
  Een dynamisch verkeersmodel beschrijft op een wiskundige manier het verkeer. Vooraleer de verschillende type modellen te bestuderen, wordt eerst een formeel wiskundig kader opgesteld waarmee het verkeer beschreven wordt.

- Microscopische verkeersmodellering en verfijnen van het model
  Een microscopisch model wordt opgezet als testomgeving. Na kalibratie en validatie wordt het verkeerspatroon realistisch weergegeven met het model. Hiermee kunnen nieuwe maatregelen uitgetest worden.

- Uitwerken controle strategie en effecten modelleren.
  Uitgaande van een macromodel zoeken we een optimale regelstrategie.

- Algemeen actieplan
  Het voorziene algemeen actieplan is er niet gekomen. Het bleek niet haalbaar om in een algemene wetenschappelijke studie een uitgewerkt plan op te stellen.

1.5 Rapportage

De verschillende stappen in het projectschema komen met de verschillende hoofdstukken in dit rapport overeen. Deze hoofdstukken komen op hun beurt overeen met de verschillende gevraagde overzichtsrapporten.

In hoofdstuk 2 komt de inventarisatie van de modellen aan bod. Dit komt overeen met het overzichtsrapport '*evaluatie van de geschiktheid van de modellen en software voor België*'. Hoofdstuk 3 behandelt de inventarisatie van de verkeerssituaties, wat ook het overzichtsrapport '*''detailstudie van huidige situatie*' behelst. In hoofdstuk 4 worden de DVM – maatregelen besproken, wat overeen komt met het overzichtsrapport '*maatregelenpakketten'.* Hoofdstuk 5 behandelt het microscopisch modelleren van de bestaande verkeerssituatie. In hoofdstuk 6 komen de controlestrategieën voor de DVM maatregelen aan bod. Dit komt eveneens overeen met het overzichtsrapport '*ontwikkeling van regelstrategieën'.* Aansluitend vindt u in appendix A de '*adviesgids voor software tools*', en in appendix B een overzicht van de publicaties die voortvloeiden uit dit project.

2. Inventarisatie modellen

2.1 Inleiding

In het algemeen beschrijft een verkeersmodel verkeersstromen gedurende een bepaalde tijdsperiode voor een zeker studiegebied. Verkeersmodellen kunnen opgedeeld worden naar kenmerken zoals detailniveau, trefzekerheid, grootte van studiegebied en periode,... Voor de modellen die hier aan bod komen beperken we ons tot dynamische verkeersmodellen. In dynamische modellen kunnen de bekomen intensiteiten en de parameters tijdsafhankelijk zijn. Verder wordt vooral gekeken naar modellen die de stromen op een autosnelweg nauwkeurig beschrijven. Doordat in het project een strook van een autosnelweg nauwkeurig bekeken wordt, is de dynamische routekeuze niet aan de orde.

Doordat in een verkeersmodel het verkeer wiskundig beschreven wordt, komt in de eerste paragraaf deze wiskundige omkadering aan bod. Vervolgens worden dynamische macroscopische modellen toegelicht waarin het verkeer op basis van geaggregeerde variabelen beschreven wordt. Vervolgens wordt de afzonderlijke modellering van voertuigen bekeken met microscopische verkeersmodellen. Tenslotte worden de gemaakte keuzes binnen dit project ten aanzien van modellen besproken. Voor een adviesgids van dynamische verkeersmodellen met een overzicht van enkele commerciële pakketten verwijzen we naar appendix A.

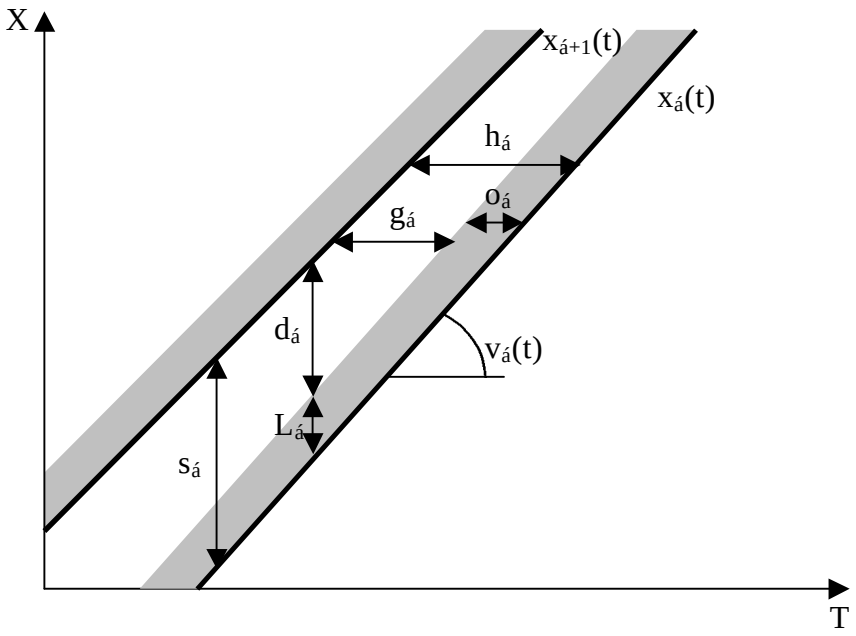
2.2 Wiskundige beschrijving van verkeer

In een eerste stap wordt een theoretisch kader ontwikkeld, waarmee het verkeer wiskundig beschreven wordt. Dit kader dient als basis bij de opzet van een dynamisch model.

Bij een microscopische beschrijving van een verkeersstroom beschouwen we de voertuigen elk afzonderlijk. De positie van een voertuig á op een weg kan aangeduid worden door $x_{á}$. De wagen die voor dit voertuig rijdt, zullen we á+1 noemen. Doordat beide voertuigen zich voortbewegen over de weg, zijn hun posities afhankelijk van de tijd. In figuur 2.1 worden de twee voertuigen in een t-x assenstelsel voorgesteld.

Een trajectorie is de positie van een voertuig door de tijd. Wanneer een voertuig als punt beschouwd wordt, is een trajectorie $x_{á}(t)$ een zuivere wiskundige functie. Bij conventie nemen we het achterste punt van een voertuig, de achterbumper, als referentie voor de trajectorie van dit voertuig.

Twee trajectories kunnen elkaar niet snijden wanneer de voertuigen op dezelfde rijstrook rijden. De snelheid van een voertuig wordt door de afgeleide van een trajectorie gegeven en de versnelling door de tweede afgeleide.



Figuur 2.1 : Twee voertuigen in een t-x assenstelsel.

Een voertuig neemt een zekere ruimte van de weg in. Dit ruimtegebruik (*space*) $s_á$ bestaat uit de fysische lengte $L_á$ van het voertuig en de volgafstand (*distance*) $d_á$ die de bestuurder op z'n voorligger aanhoudt. Analoog aan het ruimtegebruik is er ook het tijdsgebruik (*headway*) h_a van een voertuig. Dit tijdsgebruik kan opgesplitst worden in een volgtijd (*gap*) g en een bezettingstijd (*occupancy*) o_a .

Het snelheidsverschil Äv wordt gegeven door

$$\Delta v_a(t) = v_{a+1}(t) - v_a(t) = \frac{ds_a(t)}{dt}$$

Op macroscopisch niveau worden de voertuigen niet afzonderlijk beschouwd. De discrete natuur van het verkeer wordt in continue grootheden geaggregeerd. Hiertoe worden drie hoofdvariabelen gedefinieerd : de dichtheid *k*, de intensiteit *q* en de gemiddelde snelheid *u*.

- De dichtheid *k* is een typisch natuurkundige grootheid die overgewaaid is naar de verkeerskunde. De dichtheid *k* geeft het aantal voertuigen per kilometer weg weer. Op een constant tijdstip kan *k* over een wegsectie met lengte ÄX eenvoudig gemeten worden.

  $$k = \frac{n}{\Delta X}$$

  n is hierbij het aantal voertuigen dat zich op het bewuste tijdstip in het weginterval ÄX bevindt. Deze definitie kan uitgebreid worden tot een willekeurig meetinterval S, een oppervlakte in de t-x ruimte. Hierdoor wordt *k* gelijk aan:

  $$k(x,t,S) = \frac{\text{Totale Verblijftijd van de voertuigen in S}}{Opp(S)}$$

- De intensiteit *q* kan vergeleken worden met het debiet of de flux van een stroom. De intensiteit geeft het aantal voertuigen per tijdseenheid weer. Voor een tijdsinterval ÄT kan de intensiteit op een bepaalde locatie berekend worden als:

$$q = \frac{m}{\Delta T}$$

Hierbij is *m* het aantal voertuigen dat gedurende ÄT de beschouwde locatie passeert. Opnieuw kan deze definitie uitgebreid worden tot een willekeurig meetinterval S :

$$q(x,t,S) = \frac{\text{Totale Afgelegde afstand van de voertuigen in S}}{\text{Opp(S)}}$$

- De gemiddelde snelheid *u* definiëren we als het quotiënt van de intensiteit met de dichtheid. De gemiddelde snelheid is dus eveneens afhankelijk van de lokatie, het tijdstip en het meetinterval.

$$u(x,t,S) = \frac{q(x,t,S)}{k(x,t,S)} = \frac{\text{Totale Afgelegde afstand van de voertuigen in S}}{\text{Totale Verblijftijd van de voertuigen in S}}$$

De definitie van de gemiddelde snelheid kan herschreven worden tot de fundamentele relatie $q = k.u$. Deze drie geaggregeerde grootheden zijn hierdoor steeds met elkaar gekoppeld. De kennis van twee grootheden leidt automatisch tot de derde.

Al deze variabelen kunnen gemeten worden. Het gebruik van een vliegtuig om uitgaande van twee kort na elkaar genomen foto's de posities, de snelheden, de bezettingstijden, het tijdsgebruik, de volgtijden of de dichtheid op te meten, gebeurt nauwelijks. Detectielussen, werkend volgens het magnetisch-inductie-principe, en detectiecamera's kunnen vrij goedkoop de snelheid, het ruimtegebruik, de lengte, de volgafstand en de intensiteit van voertuigen opmeten.

Er rijden meestal verschillende types voertuigen en bestuurders op een weg. De geïdealiseerde verkeerstoestand met slechts 1 type weggebruikers heten we 'homogeen'. Wanneer de voertuigen een constante snelheid aanhouden, de trajectories zijn dan rechten en de versnelling nul, bestempelen we de verkeerstoestand als 'stationair'.

2.3 Macroscopische modellen

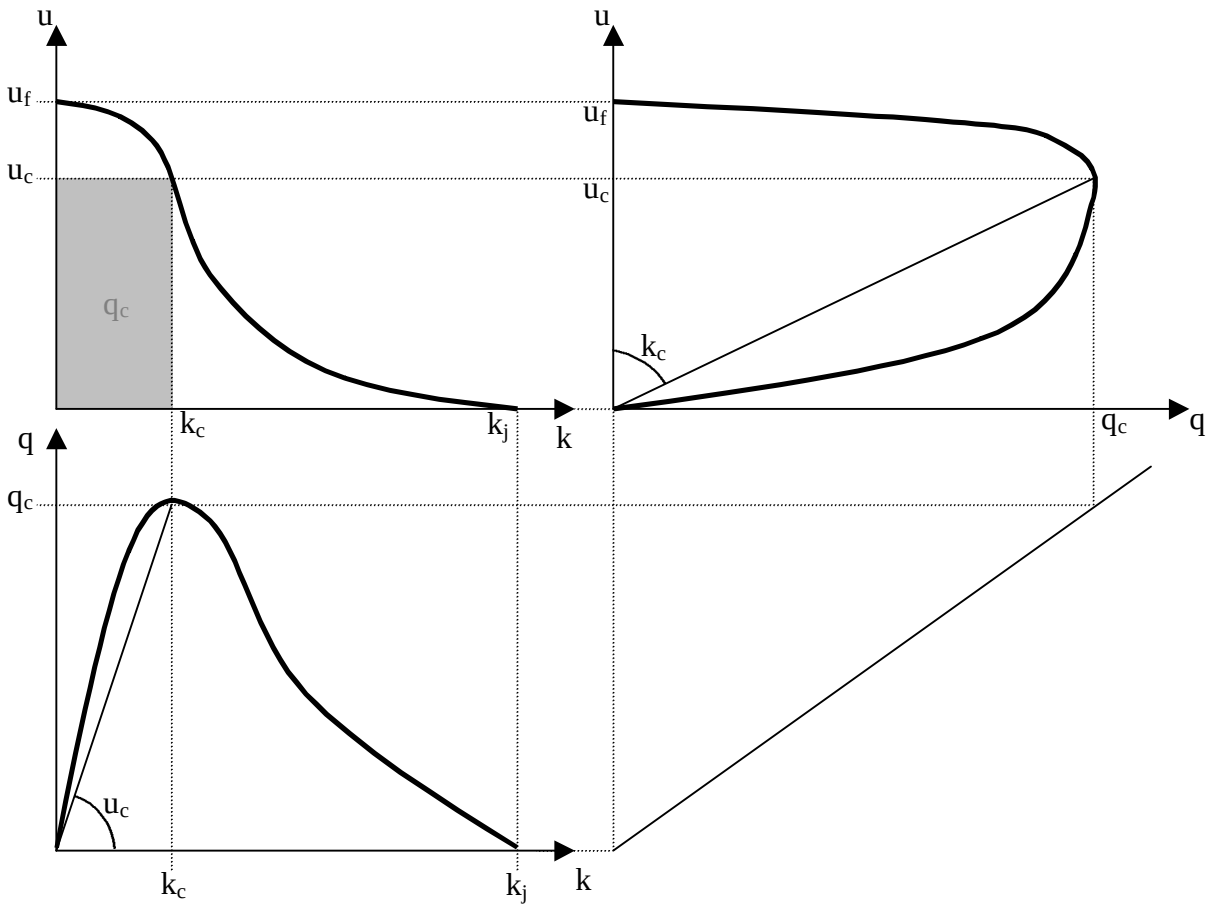
Wanneer een verkeersstroom met behulp van de geaggregeerde grootheden beschreven wordt, spreken we van een macroscopisch model. Na het fundamenteel diagram wordt het basis dynamisch verkeersmodel besproken. Tot slot worden enkele verkeerssituaties geanalyseerd en verkeersregimes gedefinieerd.

2.3.1 Fundamenteel diagram.

Een verkeerstoestand van een weg kan met drie variabelen, de intensiteit *q*, de dichtheid *k* en de gemiddelde snelheid u beschreven worden. Doordat deze door de relatie $q = u.k$ gekoppeld zijn, blijkt dat er slechts sprake is van twee onafhankelijke grootheden. Door empirisch een relatie op te stellen tussen de twee resterende onafhankelijke grootheden, is het mogelijk de verkeerstoestand van een weg met slechts één grootheid te karakteriseren.

De empirische relatie tussen de twee overgebleven variabelen kan grafisch in drie diagrammen weergegeven worden. In een dergelijk diagram wordt de relatie tussen twee van de drie grootheden voorgesteld. Op figuur 2.2 worden ze alle drie geschetst en de overeenkomsten ertussen aangeduid. Merk op dat deze empirische diagrammen

geldig zijn voor een specifieke weg voor een homogeen samengestelde verkeersstroom die stationair is.



Figuur 2.2 : De drie gerelateerde fundamantele diagrammen.

Door de relatie $q = k.u$ kan op een diagram telkens de derde grootheid weergevonden worden. Op het q-u en het k-q diagram wordt de derde grootheid als een hoek weergevonden. De intensiteit in het k-u diagram is een oppervlakte.

De dikke zwarte lijn op de diagrammen, is de verzameling van alle mogelijke stationaire verkeerstoestanden. Een dergelijk fundamenteel diagram is geldig voor een bepaalde weg en wordt vanuit waarnemingen opgesteld. Het stationaire en homogene verkeer bevindt zich dus altijd in een toestand die zich op de zwarte lijn bevindt. Enkele speciale toestandspunten verdienen extra aandacht :

- Volledig vrij verkeer
  Wanneer voertuigen niet gehinderd worden door ander verkeer, rijden ze met een maximale snelheid u_f (*free speed*). Deze snelheid is afhankelijk van de ontwerpsnelheid van de weg en de geldende snelheidsbeperkingen. Op dat moment zal de intensiteit en de dichtheid nagenoeg nul zijn.
- Verzadigd verkeer
  Op een verzadigde weg is de intensiteit en de snelheid nul. De voertuigen staan er in een rij met een maximale dichtheid k_j (*jam density*).

- Capaciteitsverkeer
  De capaciteit van een weg wordt gegeven door de maximale intensiteit q_c. Op dat moment is er een bijhorende capaciteitssnelheid u_c en een capaciteitsdichtheid k_c. De capaciteit van een weg wordt dus niet bereikt bij een maximale snelheid.

2.3.2 Het 'eerste orde' macroscopisch dynamisch verkeersmodel

Het werkelijk verkeer is echter niet stationair en de verkeerstoestand verandert dan ook voortdurend. Met een dynamisch macroscopisch model wordt getracht de verandering van de grootheden q(x,t), u(x,t) en k(x,t) door de tijd en voor verschillende locaties te beschrijven. De intensiteit, de gemiddelde snelheid en de dichtheid worden als puntvariabelen verondersteld die op elk moment en op elke locatie eenduidig gedefinieerd zijn. Hierdoor kunnen we deze drie grootheden als functie in het x-t vlak weergeven.

In het eerste orde model, beter gekend als het Lighthill - Witham - Richards (LWR) model, worden de veranderingen van de macroscopische grootheden door tijd en plaats met een verkeersbehoudswet beschreven. Hierbij blijft de fundamentele relatie q(x,t)=k(x,t).u(x,t) geldig. Verder wordt verondersteld dat ook de dynamische verkeerstoestanden met de stationaire fundamentele diagrammen beschreven kunnen worden. Dit wil zeggen dat de verkeerstoestand van een weg kan veranderen, maar op ieder moment aan de fundamentele diagrammen voldoet. Hierdoor bewegen de opeenvolgende verkeerstoestanden als het ware over de zwarte lijn in de fundamentele diagrammen.

De behoudswet ziet er als volgt uit:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = z(x,t)$$

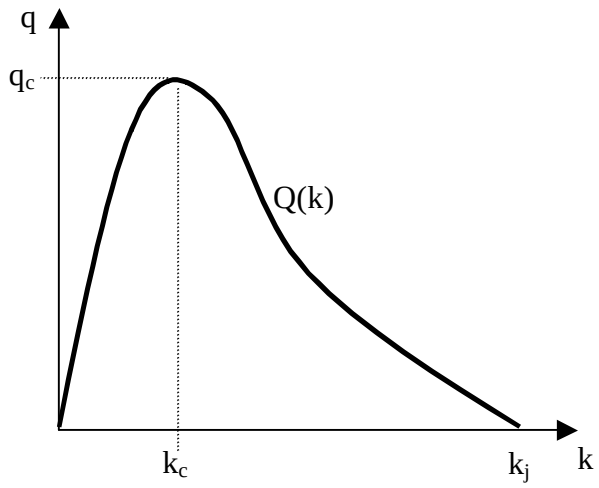
Door de veronderstelling dat het verkeer op elke locatie en elk tijdstip voldoet aan de stationaire diagrammen kan de intensiteit q(x,t) vervangen worden door de relatie uit de fundamentele diagrammen :

$$q(x,t) = Q\big(k(x,t)\big)$$

Hierdoor bekomen we een partiële differentiaalvergelijking in één grootheid, met name k(x,t).

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{dQ(k(x,t))}{dk}\frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = z(x,t)$$

Hierbij is z de hoeveelheid verkeer dat per tijds- en plaatseenheid de weg oprijdt (een negatieve waarde voor afrijdend verkeer). Het fundamenteel diagram zoals weergegeven in figuur 2.3 komt als Q(k) in bovenstaande formule naar voor.



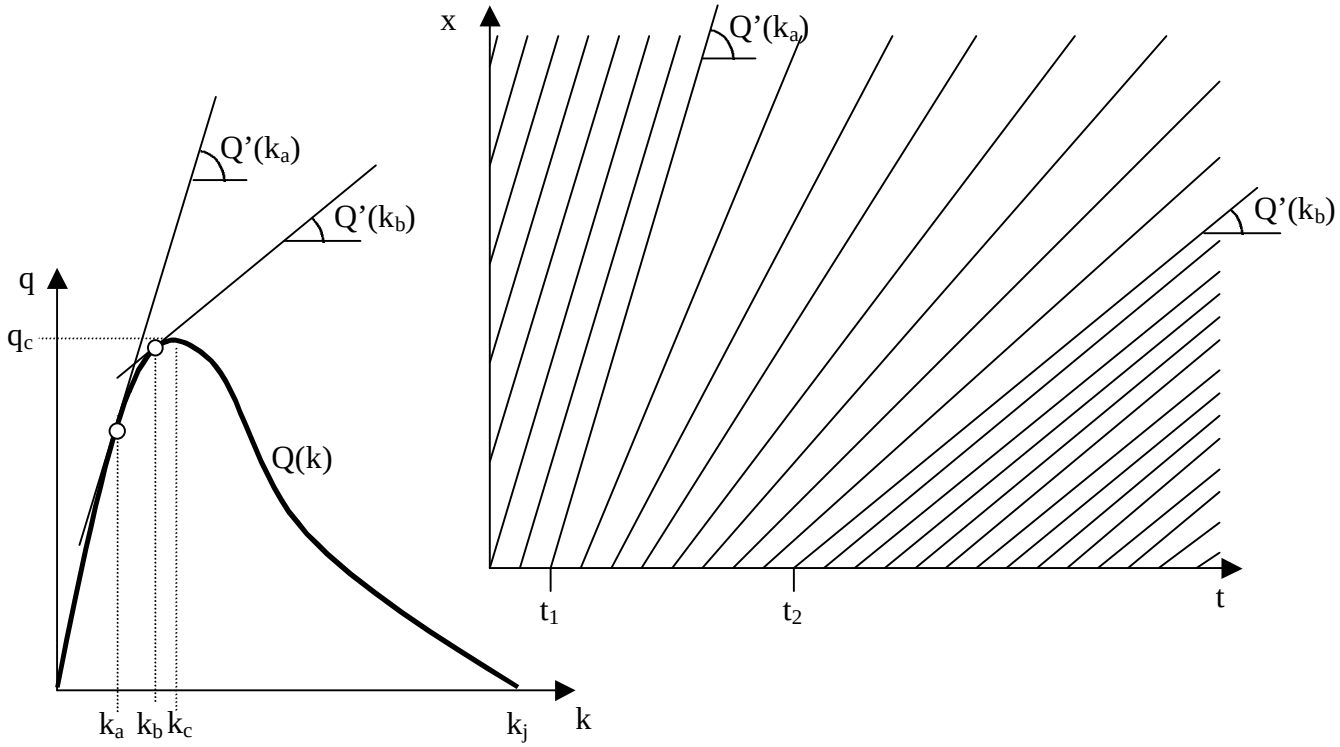
Figuur 2.3 : Het fundamenteel diagram Q(k).

Er zijn verschillende numerieke schema's ontwikkeld om deze vergelijking met een computer in een bruikbaar verkeersmodel te implementeren, maar ook analytisch kan dit model met de methode van de karakteristieken bestudeerd worden.

2.3.3 Analyse van enkele verkeerssituaties

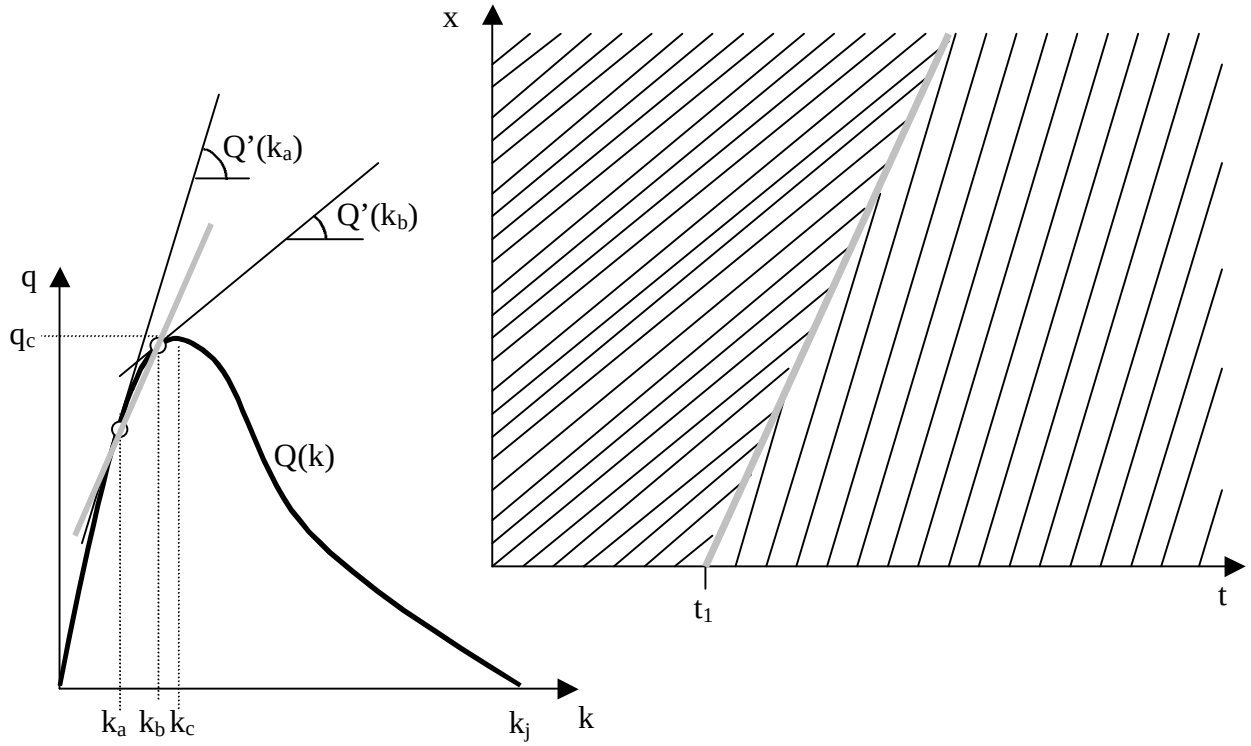
De verkeersbehoudswet, die de basis vormt van het eerste orde verkeersmodel, is in de wiskunde een gekende partiële differentiaalvergelijking, met name de 'Burgers vergelijking'. Met gegeven rand- en beginvoorwaarden kan deze analytisch opgelost worden met karakteristieken. Karakteristieken zijn lijnen in de x-t ruimte waarlangs de dichtheid, en bijgevolg ook de intensiteit en de gemiddelde snelheid, constant is. Een karakteristiek verbindt dus alle tijdstippen en plaatsen met een zelfde verkeerstoestand. Uit de behoudswet volgt dat deze karakteristieken rechten zijn. De helling van deze karakteristieken is in de x-t ruimte een snelheid. Deze helling blijkt gelijk te zijn aan $\frac{dQ(k)}{dk} = Q'(k)$.
Uitgaande van de dichtheid bij het begin en op de rand, kunnen dus karakteristieke rechten getekend worden met een helling die gegeven wordt door Q'(k).

Ter illustratie worden in figuur 2.4 de karakteristieken getekend voor een weg met een homogene dichtheid k_a op $t < t_1$. Deze dichtheid neemt tussen t_1 en t_2 toe tot k_b. De weg (x-t) en het fundamentele k-q diagram zijn zodanig getekend dat de helling dezelfde snelheid weergeeft op beide figuren. Pas op: karakteristieken zijn geen trajectories, maar lijnen van gelijke verkeerstoestand. Op een karakteristiek is de gemiddelde snelheid, de dichtheid en de intensiteit dus constant.



Figuur 2.4 : De karakteristieken van drukker wordend verkeer.

Wanneer twee karakteristieken, met verschillende dichtheden, elkaar kruisen, verandert het verkeer er abrupt van toestand. Dit fenomeen noemen we een schokgolf.

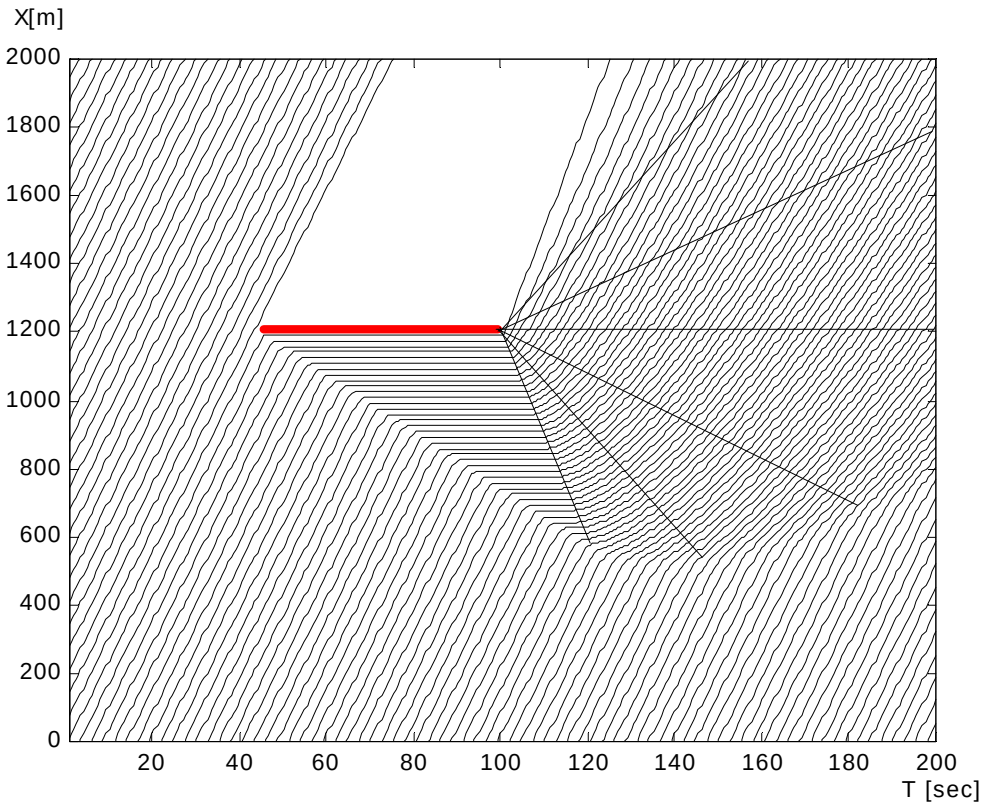


Figuur 2.5 : Een schokgolf.

Schokgolven komen voor bij drukker wordend verkeer en de snelheid van deze schokgolven kan grafisch op het fundamenteel diagram worden teruggevonden. De helling van de rechte die de twee verkeerstoestanden met elkaar verbindt, geeft de schokgolfsnelheid weer. Op figuur 2.5 wordt dit geï llustreerd. Op deze weg is het verkeer homogeen met een dichtheid k_b voor $t < t_1$. Daarna daalt de dichtheid abrupt tot k_a. Hierdoor ontstaat er een schokgolf die zich in de rijrichting voortplant.

In werkelijkheid zullen voortdurend kleine verstoringen in de verkeerstoestand optreden. Deze perturbaties zullen kleine schokgolven veroorzaken die nagenoeg gelijk verlopen met de karakteristieken.

Bij een verkleining van de dichtheid ontstaat een waaier van schokgolven. In figuur 2.6 wordt de verkeerssituatie na een verkeerslicht weergegeven. Wanneer het licht op groen springt ontstaat een waaier van karakteristieken, die tot uiting komt in een steeds veranderende snelheid van de individuele voertuigen. De helling van de trajectories, of dus de snelheid van de voertuigen, is identiek op alle punten waar een uitwaaierende trajectorie gesneden wordt. De verkeerstoestand op een karakteristiek verandert namelijk niet.



Figuur 2.6 : Trajectories bij verkeerslichten.

2.3.4 Verkeersregimes

De aard van de schokgolven en de helling van de karakteristieken worden door de afgeleide van Q'(k) bepaald. Naargelang het teken van Q'(k) kunnen verkeersregimes gedefinieerd worden die de aard van de golfvoortplanting bepalen.

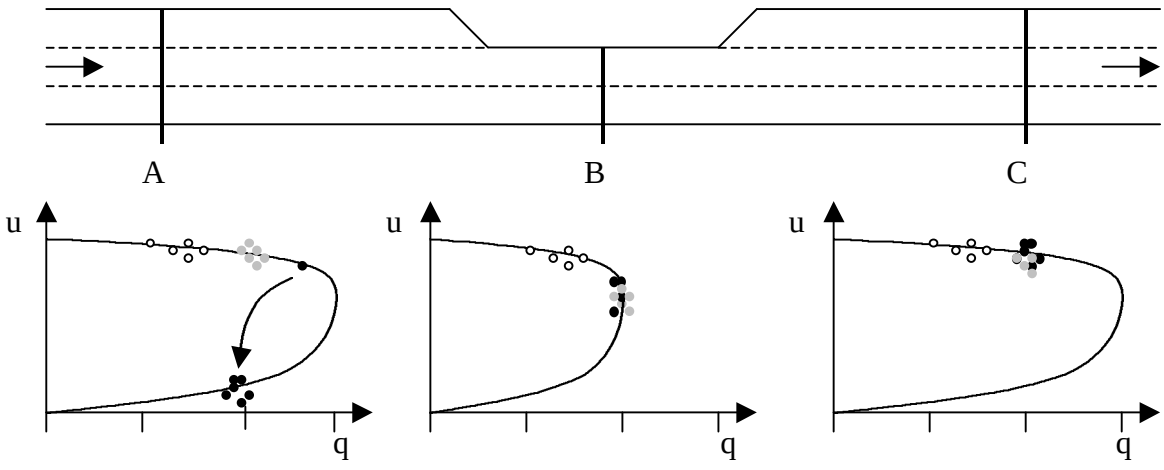
Volgende verkeersregimes kunnen we definiëren:

- Vrij verkeer (*free flow*)
  Bij vrij verkeer is de dichtheid kleiner dan de capaciteitsdichtheid k_c en is de gemiddelde snelheid van de verkeersstroom hoger dan de capaciteitssnelheid u_c. Voor vrij verkeer is Q'(k) positief. Schokgolven binnen dit regime planten zich voort in de rijrichting. De illustraties in figuur 2.4 en 2.5 behandelden telkens vrij verkeer.
  Doordat kleine verstoringen zich met de rijrichting mee voortbewegen, kunnen we zeggen dat de kenmerken van dit verkeersregime stroomopwaarts bepaald worden.

- Congestie (*congestion*)
  Bij verkeer met een snelheid die lager is dan de capaciteitssnelheid u_c en dus een dichtheid tussen de capaciteitsdichtheid k_c en de maximale dichtheid k_j spreken we van congestie. In de volksmond kennen we dit regime beter als file.
  Gedurende congestie is Q'(k) negatief. Perturbaties in dit verkeersregime planten zich voort tegen de rijrichting in. De kenmerken van een file worden dus stroomafwaarts bepaald.

- Capaciteitsverkeer
  Capaciteitsverkeer wordt als een afzonderlijk regime beschouwd. In dit regime is de intensiteit maximaal.
  Bij capaciteitsverkeer is Q'(k) gelijk aan nul. Dit regime kan zich dan ook niet voortplanten in de verkeersstroom. Kleine perturbaties in dit regime maken van de verkeersstroom vrij verkeer of congestie. Capaciteitsverkeer blijft dus stilstaan en fungeert dan ook als opwaartse randvoorwaarde van congestie en als afwaartse randvoorwaarde voor vrij verkeer. De plaats waar dit verkeersregime optreedt noemen we ook de bottleneck van het verkeersnetwerk.

Een voorbeeld zal de evolutie van deze regimes op een snelweg verduidelijken. Op de hieronder afgebeelde snelweg met rijrichting van links naar rechts is er een lokale wegversmalling waar de capaciteit een derde kleiner is. De bijhorende fundamentele u-q diagrammen zijn voor de drie secties schematisch afgebeeld. Voor fundamentele diagrammen van een werkelijke situatie verwijzen we naar hoofdstuk 3. De verschillende verkeerstoestanden zijn met punten op de fundamentele diagrammen afgebeeld. Zoals in de praktijk liggen deze punten niet altijd op de diagrammen.



Figuur 2.7 : Een snelweg met bijhorende fundamentele diagrammen.

De drie opeenvolgende verkeerssituaties die op de diagrammen aangeduid zijn worden hier besproken:

- (1) Een lage verkeersvraag.

  Wanneer weinig voertuigen zich opwaarts van de beschouwde autosnelweg aanbieden, spreken we van een lage verkeersvraag. Het 'vrij verkeer' plant zich voort in de rijrichting en de intensiteit zal dan ook op alle locaties hetzelfde zijn.

- (2) Een verkeersvraag die gelijk is aan de capaciteit van de versmalling.

  Bij een stijgende verkeersvraag zal de intensiteit toenemen. Wanneer de verkeersvraag juist gelijk is aan de capaciteit van de versmalling treedt daar het capaciteitsregime op. Merk op dat ter hoogte van de versmalling de snelheid iets lager zal zijn dan in de voor- en achterliggende secties.

- (3) Een verkeersvraag die groter is dan de capaciteit van de versmalling.

  Wanneer de verkeersvraag nog toeneemt, zal de intensiteit ter hoogte van de versmalling gelijk blijven aan de capaciteit. Capaciteitsverkeer blijft er het geldende regime.
  Voor de sectie voorbij deze bottleneck zal de intensiteit niet hoger worden dan de capaciteit van de versmalling. Het verkeer blijft er in een 'vrij' regime. De versmalling fungeert hier dus als stroomopwaartse randvoorwaarde.
  Vanuit de versmalling zal er een schokgolf vertrekken tegen de rijrichting in. Wanneer deze schokgolf nog niet gepasseerd is, zal het verkeer er tijdelijk nog 'vrij' zijn met een intensiteit die iets hoger kan zijn dan de capaciteit van de bottleneck. Nadat de schokgolf passeerde, is er congestie. De intensiteit is dan gelijk aan de capaciteit van de bottleneck, terwijl de snelheid iets lager is dan in de versmalling.
  Het stuk van de verkeersvraag dat groter is dan de capaciteit van de versmalling wordt dus opgestapeld in een congestieregime. Hoe groter de verkeersvraag hoe sneller de file aangroeit.

De werking van 'bottlenecks' is een belangrijk mechanisme in het functioneren van ons wegennet en het fileprobleem. De locatie en het tijdstip van werking bepalen de plaats en lengte van de file. In het voorbeeld zorgde de fysieke versmalling van de snelweg voor een bottleneck. Andere situaties zorgen voor gelijkaardige 'bottleneck'-effecten :

- Wanneer er via een oprit veel verkeer de autosnelweg komt opgereden, is de verkeersvraag voorbij de oprit aanzienlijk hoger dan stroomopwaarts van de oprit. Hierdoor wordt de capaciteit net voorbij de oprit sneller bereikt en treedt daar vaak een bottleneck in werking.
- Door een lokale inhomogeniteit (vb enkele vrachtwagens op een rij, ...) wordt de capaciteit lokaal en tijdelijk iets lager, zodat er een bottleneck in werking kan treden.

- Een ongeval zorgt ook voor een lokale en tijdelijke vermindering van de capaciteit en veroorzaakt het gevreesde 'bottleneck' effect.
- Slecht weer haalt de capaciteit naar omlaag. Vaak gebeurt dit vrij lokaal (vb rijm- en ijsplekken op een brug).

2.3.5 Hogere orde modellen

Bij hogere orde modellen wordt het verkeer niet meer altijd stationair verondersteld. Het fundamenteel diagram wordt er door een momentenvergelijking vervangen.

Deze modellen kunnen vanuit microscopische aannames voortkomen. Zo komt het model van Payne met een microscopische aanname tot een momentenvergelijking.
Prigogine introduceerde een mesoscopische aanpak om tot de hogere orde vergelijkingen te komen. Hierin wordt een dichtheid gedefinieerd per snelheid. De dichtheid k(x,t,v) geeft het aantal wagens per lengte-eenheid weer met de snelheid v. Uit aannames omtrent de snelheidsverdeling en de interactie tussen de verschillende snelheidscategorieën worden dan hogere orde vergelijkingen opgesteld.

Hogere orde vergelijkingen hebben termen die aan gas en vloeistoftheorieën doen denken zoals viscositeit en diffusie.

2.4 Microscopische modellen

Een microscopisch verkeersmodel beschrijft de interacties van de verschillende voertuigen en bestuurders met elkaar en met de infrastructuur. Doordat het gedrag van iedere bestuurder niet exact te voorspellen valt zijn dit meestal stochastische modellen. Ze worden als simulatiemodel met een computer geï mplementeerd. De kenmerken van de bestuurder en het voertuig op tijdsstap t + Ät worden op basis van hun kenmerken op tijdsstap t berekend. Op die manier worden o.a. de posities en de snelheden van alle voertuigen berekend. Ten opzichte van macroscopische dynamische modellen kunnen gemakkelijker verschillende types van voertuigen en bestuurders gespecifieerd worden.

De meeste micro-simulatiemodellen kunnen als volgt ontleed worden:

- Het voertuigvolg-model (car-following model)
  Hierin wordt de versnelling van een voertuig bepaald op basis van het voorrijdende voertuig.
- Het rijstrook-wissel-model (*lane-change-model*)
  De manier waarop een voertuig van rijstrook verandert op basis van de in zijn nabije omgeving rijdende voertuigen komt hier aan bod.
- Route keuze model
  Net zoals in het prognosemodel moeten de voertuigen zich een kortste weg door het infrastructuurnetwerk zoeken. De HB matrix wordt per tijdsperiode (vb voor 15 minuten) ingegeven zodat we van een dynamische HB matrix spreken. De routekeuze gebeurt op basis van een veralgemeende reisweerstand. De reistijd, een onderdeel van de reisweerstand, kan simultaan opnieuw verrekend worden.
- Extra modules
  Doordat de positie, snelheid en versnelling van iedere wagen om de halve seconde gekend is, kunnen deze modules makkelijk afgeleide effecten zoals vervuiling, lawaaihinder, tijdsverlies en economische kosten berekenen.

Naast de voertuigen kunnen ook dynamische kenmerken van het infrastructuursysteem, zoals verkeerslichten, weersomstandigheden en ongevallen, gemodelleerd worden.

Deze microscopische modellen kunnen door hun gebruiksvriendelijkheid en vele parameters een realistisch verkeersbeeld weergeven. Door hun veelheid aan parameters worden ze soms wat minder doorzichtelijk en vergen ze veel rekenkracht.

2.5 Keuzeopties in het project

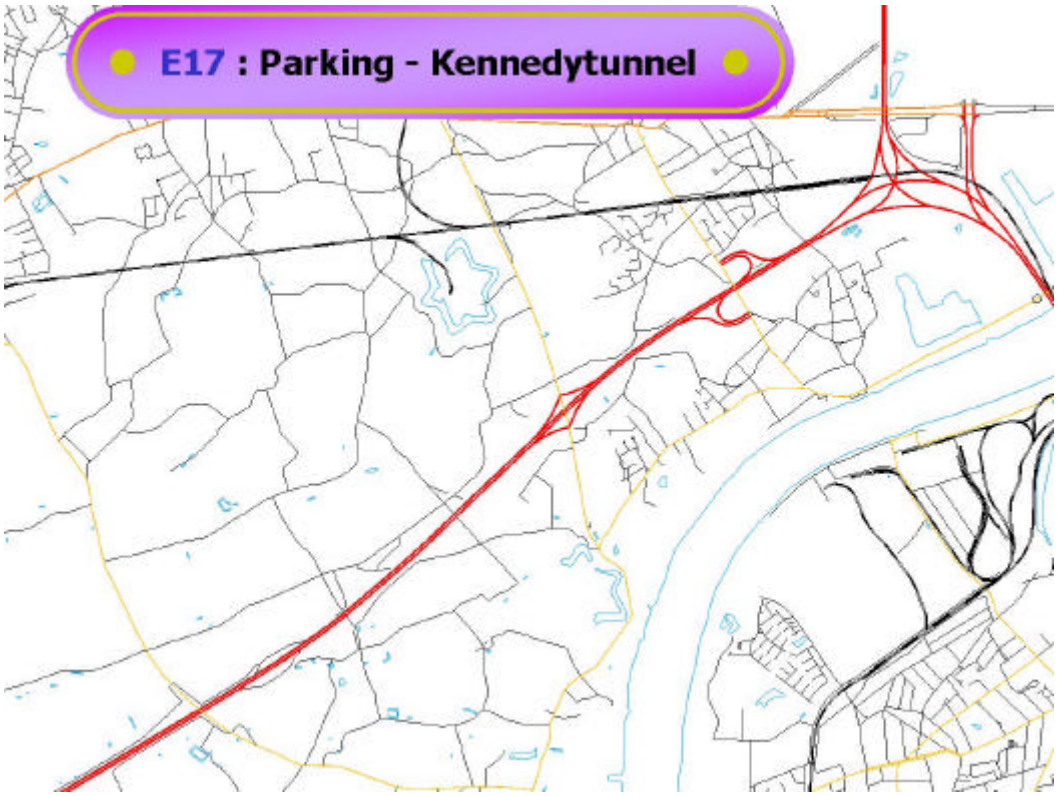
In dit project werd de microscopische en de macroscopische modelaanpak gecombineerd. Als weergave van de real-time verkeerssituatie werd gekozen voor de microscopische modellen. Deze modellen fungeren dan als de werkelijkheid bij het uitwerken van regelstrategieën. Het optimaliseren van een verkeerscontrole-regeling vergt echter een snel model dat de werkelijkheid mogelijk wat minder gedetailleerd weergeeft, maar dat flexibeler en minder complex is. Voor de sturing van de dynamische verkeersmaatregelen werd dan ook gekozen voor een macroscopisch model.

3. Inventarisatie verkeerssituaties

Dit project richt zich hoofdzakelijk op autosnelwegen. Het verkeer is er, vanuit verkeerskundig opzicht, beheersbaar: de op- en afritten zijn duidelijk gelokaliseerd, verkeersstromen kruisen elkaar niet en de voertuigen stromen relatief homogeen in één richting. Verder wordt de verkeerstoestand op het snelwegennet systematisch gemeten. In België liggen voor en na elk op- en afritcomplex een set verkeerslussen. Deze meten per minuut de intensiteit, de gemiddelde snelheid en de bezettingsgraad. Op enkele stroken zijn detectiecamera's aanwezig die een gedetailleerder beeld van de verkeerssituatie mogelijk maken. In dit project wordt met een dergelijke strook gewerkt. In een eerste paragraaf wordt deze strook beschreven. Vervolgens komt de dataverwerking van de meetgegevens aan bod. Tenslotte wordt aan de hand van deze telgegevens de verkeerssituatie geanalyseerd.

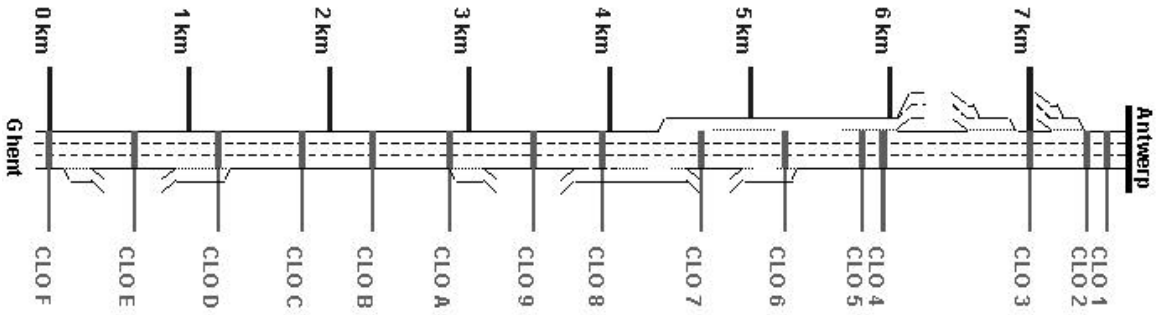
3.1 Beschrijving proefstrook

Meten is weten. Hierdoor is de aanwezigheid van meetgegevens en meetinstrumenten van doorslaggevend belang bij het kiezen van een gevalstudie. In het kader van een Europees project werden 15 detectiecamera's over een lengte van 8 kilometer geï nstalleerd op de E17 Gent– Antwerpen. In de rijrichting van Antwerpen, in de sectie die loopt tot vlak voor de Kennedytunnel en die in figuur 3.1 weergegeven wordt, worden de intensiteit en de tijdsgemiddelde snelheid opgemeten. Het onderscheid naar voertuigtype blijkt veel gebreken te vertonen, zodat deze voertuigherkenning niet meegenomen wordt in deze studie.



Figuur 3.1: overzicht proefstrook.

De snelweg heeft over deze strook drie rechtsgelegen op- en afritten gevolgd door een linkse afrit en door twee linkse opritten. De snelweg buigt af naar rechts tussen kilometer 6 en 7. De vijftien cameradetectoren, genummerd van CLO F tot CLO 1, meten de intensiteit (vtg/min) en de gemiddelde snelheid (km/uur) per minuut, per rijstrook. Het studiegebied wordt schematisch weergegeven in figuur 3.2.

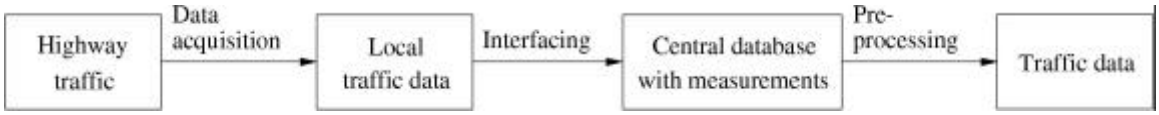


Figuur 3.2: Het studiegebied.

Deze strook is ’s morgens onderhevig aan structurele congestie en biedt, door het grote aantal detectoren, de mogelijkheid om het dynamisch karakter van de verkeersstroom te bestuderen.

3.2 Dataverwerking

Alvorens zinvolle verkeerskundige uitspraken te kunnen maken aan de hand van deze verkeersdata dienen deze gegevens verwerkt te worden. Deze dataverwerking valt zoals aangegeven in figuur 3.3 uiteen in drie stappen: data acquisitie, interfacing en voorbewerking (pre processing).



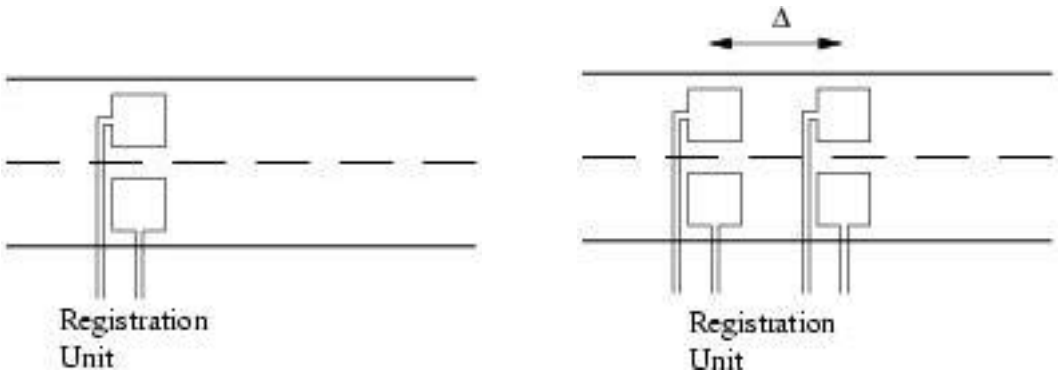
Figuur 3.3: Schematische voorstelling van de volledige dataverwerkingsprocedure.

De eerste stap bestaat uit het bekomen van metingen (data acquisition) van de gewenste parameters gebruik makend van sensoren. We vermelden kort de drie belangrijkste sensortechnologieën in de Belgische situatie. De volgende stap is het transport van de data van de sensorlocatie naar een centraal computersysteem: interfacing. Na het transport en de opslag van de meetgegevens beschikken we over een database met ruwe meetgegevens van een bepaalde tijdsperiode. Over het algemeen zal deze ruwe sensordata fouten bevatten of zullen metingen ontbreken ten gevolge van uitgevallen sensoren, meetfouten, problemen met de data-link enz. Sommige toepassingen, zoals microsimulatie bvb., vereisen echter een volledige gegevensset zonder ontbrekende gegevens. Daarom bespreken we in de paragraaf over voorbewerking een manier om op een efficiënte wijze ontbrekende gegevens te schatten.

3.2.1 Data acquisitie

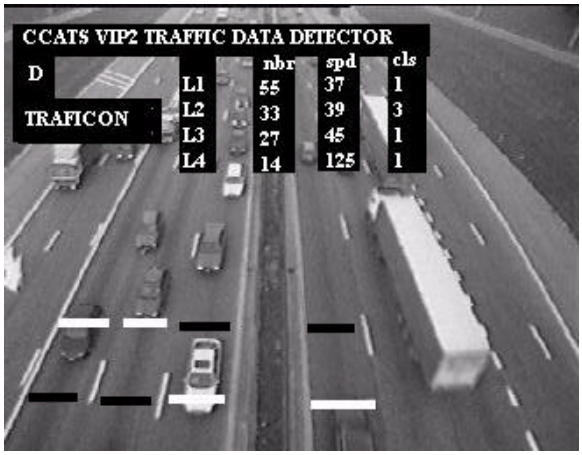
De drie belangrijkste types sensoren die in gebruik zijn langsheen de Belgische snelwegen zijn: lusdetectoren, cameras en pneumatische detectoren.

De meest gebruikte sensor in België is de *lusdetector*. Deze bestaat uit een geleidende lus die in het wegdek wordt aangebracht. De detectie van voertuigen steunt op een verschuiving van de inductantie van de lus als wagens zich boven de lus bevinden. Een voordeel van lusdetectoren is hun relatief lage kost t.o.v. sommige andere technologieën, maar als belangrijkste nadelen vermelden we de beperkte nauwkeurigheid (vooral in situaties met zeer weinig of extreem veel verkeer) en het grote risico op beschadiging bij wegwerkzaamheden. De nauwkeurigheid van lusdetectoren wordt soms verbeterd door deze in dubbele configuratie uit te voeren. Bijkomend voordeel van een dubbele configuratie is dat een veel nauwkeurigere schatting van de snelheid van de voertuigen mogelijk wordt (door gebruik te maken van de vertraging tussen activatie van lus 1 en lus 2 en de gekende afstand Δ tussen beide lussen). Een schematische weergave van een enkele (links) en een dubbele (rechts) configuratie van lusdetectoren wordt weergegeven in figuur 3.4.



Figuur 3.4 : Twee configuraties voor een lusdetector opstelling: links de enkele lus en rechts de dubbele lus opstelling.

Camera's die langs de weg worden geplaatst om de gewenste parameters te meten zijn duurder dan lusdetectoren maar daartegenover staat dat goed afgestelde camera's een grotere nauwkeurigheid kunnen behalen dan lusdetectoren. Een camera levert beelden als in figuur 3.5 die naar een beeldverwerkingsalgoritme worden gestuurd dat de gewenste verkeersparameters bepaalt. Een bijkomend voordeel van cameratechnologie is dat, indien het communicatienetwerk hierop gedimensioneerd is, de beelden kunnen worden doorgestuurd naar een verkeerscentrale voor een visuele inspectie van de verkeerstoestand. In de praktijk worden de camerabeelden in België enkel gebruikt door het beeldverwerkingsalgoritme. Enkel de resulterende parameters worden doorgestuurd. Visuele inspectie gebeurt in de praktijk door een alternatief netwerk van niet-telcamera's.



Figuur 3.5 : Beeld afkomstig van een verkeerscamera (Foto: Traficon).

Een laatste verkeersteltechnologie die we hier kort vermelden zijn de *pneumatische sensoren* die bestaan uit een flexibele buis die over de weg wordt gelegd. Wagens die over de buis rijden veroorzaken een schokgolf in de buis die ter plaatse wordt geregistreerd en verwerkt. Pneumatische sensoren worden voornamelijk ingezet voor tijdelijke metingen vanwege hun eenvoudige en snelle opstelling. Een nadeel is de beperkte nauwkeurigheid. Zo is het bijvoorbeeld moeilijk te zeggen of twee opeenvolgende wagens passeren of een vrachtwagen met vier assen.

Tot slot vermelden we nog piëzoelectrische sensoren, ultrasone sensoren, microgolfsensoren, actieve en passieve infrarood sensoren en magnetometers.

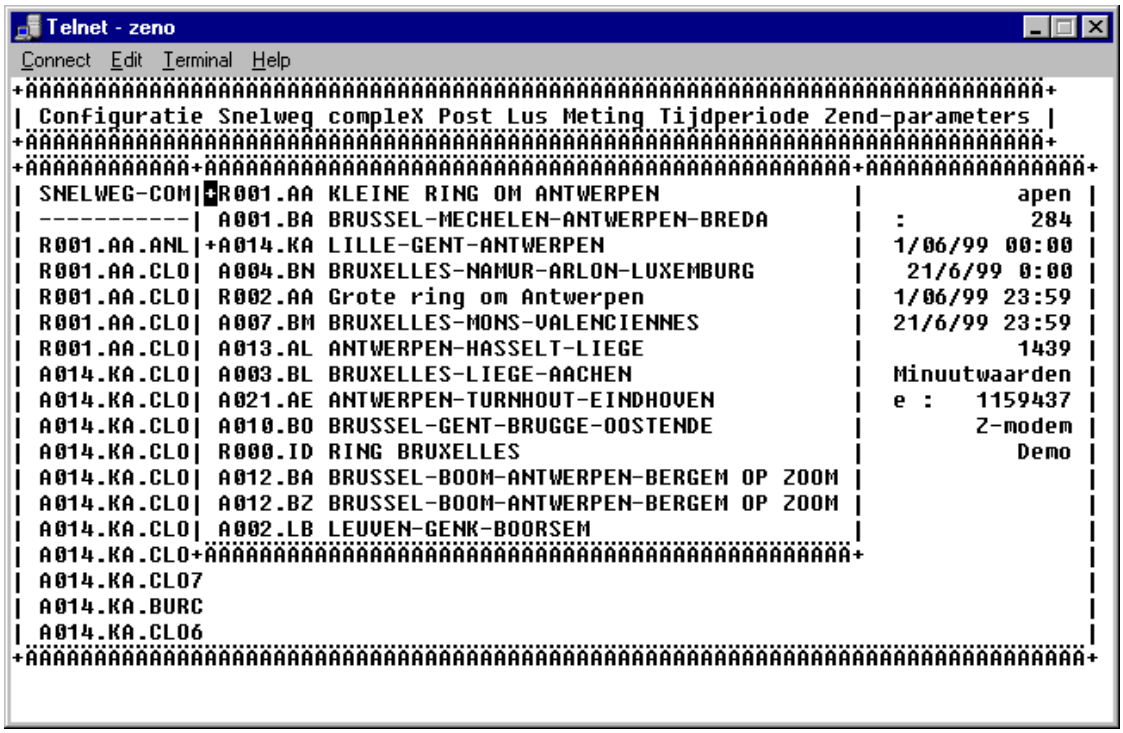
3.2.2 Interfacing

Een verkeerssysteem is een in de ruimte gedistribueerd systeem. De verkeersparameters worden gemeten op verschillende locaties langsheen de snelweg. Om de op de verschillende meetpunten opgemeten gegevens te verzamelen en om een werkbaar systeem te realiseren worden deze gegevens opgeslagen in gecentraliseerde en gestandaardiseerde gegevensbanken.

De gecentraliseerde gegevensbanken worden bijgehouden op een computer die via een netwerk verbonden is met de verschillende meetpunten. Zo staat er bijvoorbeeld in Antwerpen en in Gent een computer die de meetgegevens van zijn regio opvraagt en opslaat in een gegevensbank. Elke minuut ondervraagt de computer de sensoren voor de laatste nieuwe data en slaat deze op in de gegevensbank.

In het algemeen leveren verschillende sensoren verschillende dataformaten (bvb. camera's, lusdetectoren, …). Ook de communicatie tussen centrale computer en sensor is niet voor elk sensortype hetzelfde. Om voldoende flexibiliteit te kunnen garanderen wordt de gegevensbank en de communicatie tussen sensoren en computer gestandaardiseerd. In de praktijk 'ziet' de computer enkel lusdetectoren. Op locaties waar andere meetapparatuur staat worden de gegevens ter plekke automatisch geconverteerd naar het gegevensformaat van lusdetectoren. Dit is bijvoorbeeld ook het geval voor de camera's die wij in ons onderzoek gebruikten. Indien een telpost wordt uitgerust met nieuwe en andere apparatuur dan dient enkel de gegevensconvertor ter plekke aangepast te worden. Aan de communicatie en de gegevensbank zelf wijzigt niets. Het voordeel van de gestandaardiseerde databank is

duidelijk. Nadat de gegevens werden opgeslagen is het interessant om deze op een eenduidige manier te kunnen raadplegen. Daartoe is een modem beschikbaar die kan gebruikt worden om gegevens uit de databank te raadplegen. Een schermafdruk van de gebruikersinterface van de computer te Antwerpen is te zien in figuur 3.6.



Figuur 3.6 : Schermafdruk van de gebruikersinterface van de centrale telcomputer te Antwerpen.

3.2.3 Voorbewerking van de verkeersgegevens

Soms vallen sensoren of netwerkverbindingen uit of worden verkeerde waarden ontvangen door de telcomputer ten gevolge van stroomonderbrekingen, interferenties, onderhoudswerkzaamheden aan de sensoren,... Het resultaat zijn ontbrekende of onvolledige gegevens. Sommige toepassingen vereisen echter volledige, ononderbroken gegevensets. In dit deel bespreken we de voorbewerking of pre-processing van de gegevens. We kijken eerst naar de belangrijkste problemen die zich voordoen: corrupte of ontbrekende gegevens. Vervolgens kijken we naar een aantal mogelijke invalshoeken om de ontbrekende meetgegevens te schatten. Tot slot lichten we een specifiek ontwikkelde schattingsmethode toe die gebruik maakt van het verkeerspatroon op de snelweg in kwestie.

Corrupte data
Wanneer de gegevens van de sensoren worden ontvangen door de centrale computer wordt een test uitgevoerd om na te gaan of de ontvangen waarden geldige waarden zijn. Voor elke gemeten parameter kunnen intervallen worden gedefinieerd die gebaseerd zijn op fysische wetten en op gezond verstand. Zo kan bijvoorbeeld het aantal voertuigen dat geteld wordt niet negatief zijn, de snelheid van de voertuigen kan niet negatief zijn (behoudens zeer speciale omstandigheden) en de gemiddelde snelheid van de voertuigen is begrensd (deze kan bijvoorbeeld kleiner dan 200km/h

worden verondersteld). Indien een gemeten waarde niet binnen het vooraf gedefinieerde interval ligt, wordt deze verondersteld corrupt en onbruikbaar te zijn. Bijgevolg wordt de waarde als onbeschikbaar gemarkeerd door een sentinel-element in de database te schrijven. Op deze wijze worden corrupte gegevens omgevormd tot ontbrekende gegevens.

Ontbrekende gegevens
Naast de ontbrekende gegevens afkomstig van de test op corrupte waarden zijn er nog andere oorzaken van ontbrekende gegevens. Soms krijgt de computer geen antwoord van de sensoren omdat deze buiten gebruik zijn, omdat het netwerk onderbroken is, wegens stroomonderbrekingen, … Ook in deze gevallen worden de gegevens als niet beschikbaar gemarkeerd in de gegevensbank door een sentinel-element. In wat volgt bespreken we hoe we ontbrekende waarden kunnen schatten zodat bijvoorbeeld microsimulaties geen hinder ondervinden van de onvolledige gegevensets.

Enkele algemene schattingsalgortimen
Wanneer een meting onbeschikbaar is, kunnen verschillende technieken gebruikt worden om toch een geschatte waarde van deze meting te bekomen. In het algemeen vertrekken we van de gegevens die wel beschikbaar zijn en construeren we een funktie die de gegeven datapunten benadert. We kunnen een keuze maken uit verschillende funkties om de datapunten te benaderen: stuksgewijze lineaire funkties, polynomen, splines, … Na benadering van de gemeten punten door de funktie kan de ontbrekende waarde worden benaderd door interpolatie of extrapolatie.

Het grote voordeel van lineaire interpolatie of extrapolatie is de beperkte rekencomplexiteit. Een groot nadeel is de beperkte nauwkeurigheid, vooral indien extrapolatie wordt gebruikt, bijvoorbeeld indien de tijdsindex van de ontbrekende waarde(n) buiten het interval van de beschikbare datapunten ligt. Het belang van deze beperking neemt toe indien een meting voor meerdere opeenvolgende tijdsindices onbeschikbaar is omdat dan opeenvolgende schattingen moeten worden gemaakt. Interpolatie en extrapolatie zijn eigenlijk lokale schattingsmethoden die de omgeving van de beschikbare datapunten lineariseren. Het gebruik van deze linearisatie over een groter interval kan aanleiding geven tot grote afwijkingen tussen de geschatte en de werkelijke waarde. Daarom kunnen we een betere benaderingsfunktie trachten te gebruiken zoals een polynoom of een spline-gebaseerde benadering. Het gebruik van het groter aantal datapunten resulteert doorgaans in een toegenomen nauwkeurigheid van de schatting, maar vereist ook meer rekenkracht. In de volgende paragraaf bespreken we een probleem specifieke methode die een afweging maakt tussen nauwkeurigheid en vereiste rekenkracht.

Probleem specifiek schattingsalgoritme
Het schattingsalgoritme dat we in dit project hebben gebruikt, komt neer op een interpolatie van de ontbrekende waarden met behulp van een referentiedag. Deze referentiedag wordt offline berekend, gebruik makend van veel meetgegevens. De referentiedag voor een dag wordt gedefinieerd als een dag met een verkeersverloop dat representatief is voor het verkeersverloop van de beschouwde dag. De ontbrekende meetgegevens voor een gegeven tijdstip van de bestudeerde dag worden bepaald op basis van de laatst beschikbare meetgegevens van die dag en op basis van informatie over de verkeerssituatie op het overeenkomstig tijdstip van de referentiedag. Concreet wordt de waarde in de referentiedag overeenkomend met het

tijdstip van de ontbrekende waarde opgezocht en geschaald naar de verkeerintensiteit van de bestudeerde dag. Deze schaling gebeurt volgens volgende formule:

$$x_{data}(k) = \frac{x_{data}(k-1)}{x_{referentie}(k-1)} x_{referentie}(k)$$

waarbij $x_{data}(k-1)$ de gemeten waarde (of een schatting ervan) is van de verkeersparameter op het tijdstip net voor de ontbrekende te schatten waarde. $x_{referentie}(k-1)$ is de waarde van de verkeersparameter in de referentiedag op het tijdstip overeenkomend met het tijdstip net voor het tijdstip van de ontbrekende te schatten waarde. $x_{reference}(k)$ is de waarde van de verkeersparameter in de referentiedag overeenkomend met het tijdstip van de ontbrekende, te schatten meting $x_{data}(k)$.
Het idee achter deze methode is dat elke dag een verkeersverloop vertoont dat voorspeld kan worden, bijvoorbeeld de aanzet tot congestie tijdens de ochtend- en de avondspits. Als we een dag kunnen vinden met een gelijkaardig verkeersverloop als de bestudeerde dag, die we de referentiedag noemen, dan kunnen we de informatie over het verkeersverloop in de referentiedag gebruiken om een schatting te maken van de ontbrekende meetwaarden. Dit wordt gerealiseerd door de waarde van de verkeersparameter in de referentiedag te schalen naar het intensiteitsniveau van de huidige dag, gebruik makend van de schaalfactor $\frac{x_{data}(k-1)}{x_{referentie}(k-1)}$. Deze schaling is noodzakelijk omdat de absolute verkeersintensiteiten van de bestudeerde dag en de referentiedag niet noodzakelijk dezelfde zijn, hoewel hun verkeersverloop quasi identiek moet zijn indien een goede referentiedag werd gekozen. Een referentiedag wordt opgebouwd door het gemiddelde te nemen van de meetwaarden van verschillende dagen waarvan we verwachten dat de verkeerspatronen identiek zijn. Voor elk tijdstip wordt het gemiddelde berekend door eerst de beschikbare metingen op te tellen en vervolgens te delen door het aantal beschikbare metingen. Op deze wijze kunnen we ook dagen met ontbrekende meetgegevens gebruiken tijdens het opstellen van een referentiedag. Deze methode middelt incidentele fluctuaties van de metingen uit, wat leidt tot een betrouwbaardere referentiedag en tot robuustere schattingen.

De nauwkeurigheid van deze interpolatiemethode gebruik makend van een referentiedag wordt beïnvloedt door

- De keuze van de dagen die gebruikt worden om de referentiedag op te bouwen:
  Het verkeerspatroon van een vakantiedag ziet er geheel anders uit dan dat van een gewone werkdag, zelfs als beide dagen dezelfde weekdag zijn. Bovendien kunnen bepaalde evenementen (rockconcerten, voetbal, …) of incidenten (ongeval, wegwerkzaamheden, …) de verkeersintensiteit van bepaalde dagen beïnvloeden. Ook het weer heeft een grote invloed op de verkeerssituatie. Daarom moeten we zorg besteden aan de keuze van de dagen die we gebruiken om de referentieweek op te stellen en moeten we trachten dagen met een speciaal verkeerspatroon te weren. Het is duidelijk dat een referentieweek die bepaald wordt op basis van meer dagen ook robuuster zal zijn tegen afwijkingen afkomstig van een van die dagen.
- Het tijdsvenster dat gebruikt wordt:

Indien we een groot tijdsvenster gebruiken, wat betekent dat het gemiddelde wordt berekend over vele dagen, zullen afwijkende waarden sterk onderdrukt worden. We zouden bijvoorbeeld een referentie maandag kunnen bouwen door het gemiddelde te nemen over alle beschikbare maandagen over een heel jaar. Dit is geen goede aanpak aangezien we dezelfde referentiedag zullen bekomen voor een maandag in de zomer en een maandag in de winter. Door het tijdsvenster te groot te kiezen hebben we de niet te verwaarlozen seizoensinvloeden uitgemiddeld. Het is duidelijk dat er een afweging moet gemaakt worden tussen het uitmiddelen van stochastische effecten en 'tracking'-gedrag. Indien we het tijdvenster kleiner maken, bijvoorbeeld acht weken, dan zullen we de veranderingen in het verkeerspatroon ten gevolge van de seizoenen in rekening kunnen brengen en toch een uitmiddeling van toevallige afwijkingen bewerkstelligen.

Als vuistregel stellen we dat een goede referentiedag voor een 'doorsnee' dag (d.i. een dag zonder uitzonderlijke evenementen, werkzaamheden, …) kan berekend worden op basis van zes tot acht metingen van gelijkaardige 'doorsnee' dagen.

3.2.4 Besluit

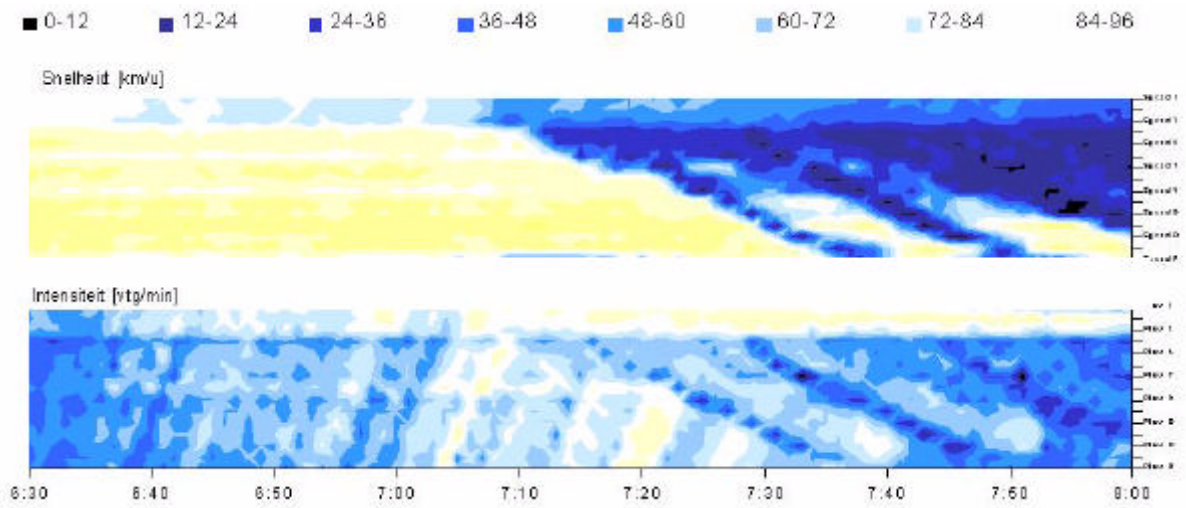
We hebben in dit project gebruik gemaakt van een schattingalgoritme gebaseerd op een referentiedag omdat dit beter presteert in gevallen waar meerdere opeenvolgende waarden ontbreken. Dit is het geval in onze toepassing daar ontbrekende waarden meestal in 'bursts' voorkomen (bijvoorbeeld het uitvallen van een sensor kan meerdere uren duren). Bovendien is deze methode rekenkundig even efficiënt als gewone interpolatie of extrapolatie eens de referentiedag berekend is. De berekening van de referentiedag kan offline gebeuren. Het algoritme gebruik makend van de referentiedag is een goede afweging tussen rekencomplexiteit en nauwkeurigheid.

3.3 Verkeerskundige analyse

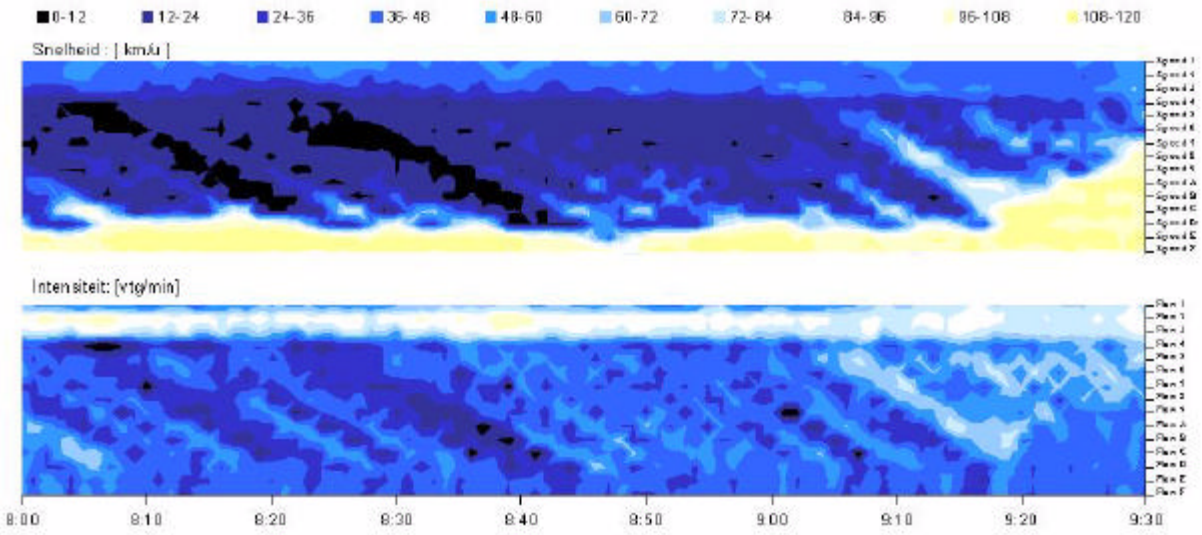
3.3.1 Meetgegevens

De verkeersdata wordt geanalyseerd aan de hand van de intensiteit (vtg/min) en de gemiddelde snelheid (km/uur) per minuut. Deze gegevens worden daartoe over de drie rijstroken uitgemiddeld en weergegeven in een tijd - plaatsdiagram. Doordat de tijdsas horizontaal staat en de plaats verticaal uitgezet wordt, rijden de voertuigen van links onder naar rechts boven. Voor elke minuut worden de snelheid en de intensiteit uitgezet. De waarden tussen de verschillende meetpunten worden geï nterpoleerd zodat een vloeiende kleurgrafiek verkregen wordt. In figuur 3.7 wordt de gemiddelde snelheid op de snelweg E17 (richting Antwerpen) op 28 september 1999 tussen 6u30 en 8u weergegeven. In figuur 3.8 wordt de intensiteit voorgesteld.

De verschillende kleuren beelden de snelheid af, uitgedrukt in km/u. Hoe donkerder de kleur, hoe kleiner de snelheid.



Figuur 3.7 : Snelheid (boven) en intensiteit op de proefstrook tussen 6u30 en 8u00.



Figuur 3.8 : Snelheid (boven) en intensiteit op de proefstrook tussen 8u00 en 9u30.

3.3.2 Eerste orde analyse

De meetresultaten worden in een eerste fase geanalyseerd met het eerste orde macroscopisch model van Lighthill en Witham in het achterhoofd. Dit eerste orde model leidt tot drie duidelijk te onderscheiden verkeersregimes : ‘vrij verkeer’, ‘capaciteitsverkeer’ en ‘congestie’.

Voor het tijdstip van 7 uur 10 minuten bevindt het verkeer zich in het ‘vrij verkeer regime’. De voertuigen rijden er met hoge snelheid en de toestandspunten van dit regime bevinden zich op de bovenste tak in het fundamenteel intensiteit-snelheids diagram. De verkeerssituatie hangt af van de toestand bovenstrooms van de bestudeerde sectie. Kleine schommelingen in de verkeersvraag veroorzaken dan ook golven die zich met de rijrichting voortbewegen. Deze golven zijn enkel bij de intensiteit te zien. Dit wijst op een snelheid die onafhankelijk is van de intensiteit wat neerkomt op een horizontale tak in het fundamenteel intensiteit-snelheids diagram.

Ter hoogte van detector CLO3 wordt de capaciteit van de weg om 7:10 bereikt door een stijgende toevoer vanaf de eerste linkse toerit. De gemiddelde snelheid zakt er en dit ‘capaciteitsregime’ houdt aan tot 9:30. De toestandspunten van dit regime bevinden zich uiterst rechts in het fundamenteel intensiteit-snelheids diagram. Deze bottleneck wordt veroorzaakt door de eerste linkstoerit. De verkeersstroom die hier invoegt zorgt ervoor dat de verkeersvraag er groter is dan in de opwaartse sectie en dat juist daar de capaciteit bereikt wordt.

Vanuit de bottleneck ontstaat het ‘congestie regime’ dat zich tegen de rijrichting in voortplant. De snelheid is laag en de toestand wordt er bepaald door de stroomopwaartse bottleneck. In het fundamenteel intensiteit-snelheids diagram bevinden we ons op de onderste tak.

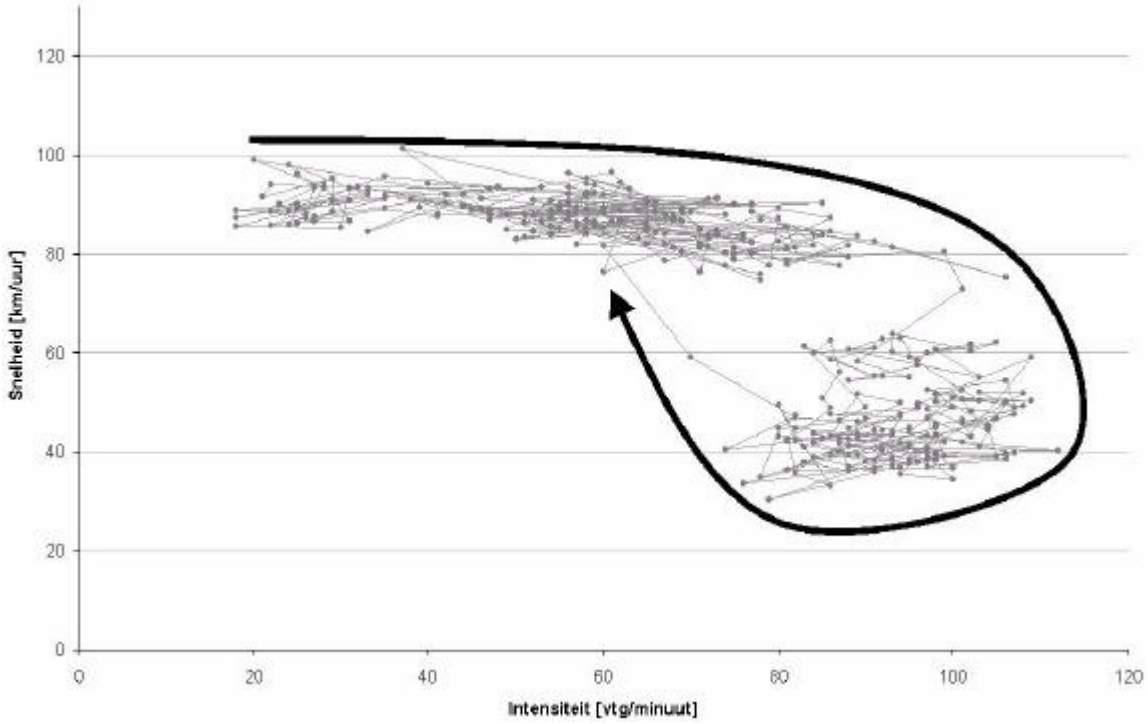
De drie regimes die vanuit het Lighthill-Witham stroommodel afgeleid worden, zijn bijgevolg duidelijk in de verkeersdata te onderscheiden. Dit biedt de mogelijkheid om deze regimes ook met een eerste orde macroscopisch model te modelleren.

3.3.3 Hogere orde effecten

Uit de verkeersmetingen kunnen naast de drie regimes nog andere effecten waargenomen worden die niet vanuit een eerste orde stroommodel kunnen worden verklaard.

De intensiteit die uit de bottleneck stroomt, ligt lager dan de maximale intensiteit, de capaciteit, die tijdens het ‘vrij verkeer regime’ bereikt wordt. Hierdoor is de intensiteit van het verkeer stroomafwaarts van de bottleneck, een ‘vrij verkeer regime’ met de bottleneck als randvoorwaarde, lager dan voor het bottleneck regime. Dit effect wordt de *capaciteitsval* genoemd en zorgt ervoor dat, in tegenstelling tot wat uit een eerste orde model blijkt, een bottleneck niet op capaciteitsniveau functioneert. Congestie is dus niet alleen hinderlijk wegens een lagere gemiddelde snelheid die als gevolg heeft dat het brandstofverbruik en de emissies groter worden en dat de reistijden dramatisch stijgen en bijgevolg de congestiekosten snel oplopen. Congestie laat een weg ook niet optimaal functioneren ten opzichte van de capaciteit, wat voorgaande effecten nog versterkt.

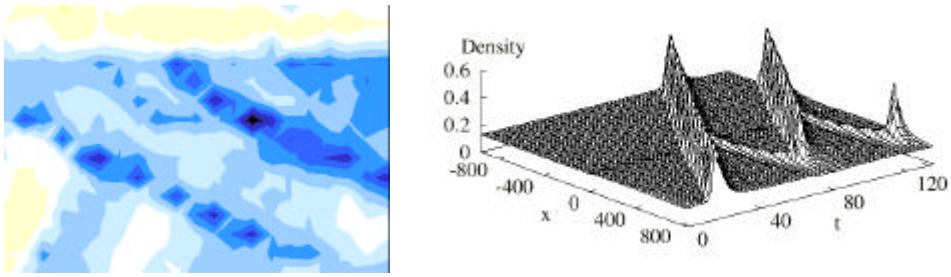
Verder blijkt dat de bottleneck in werking treedt bij het overschrijden van een intensiteit van 100 voertuigen per minuut over drie rijstroken tezamen en pas verdwijnt bij het onderschrijden van 70 vtg/min. Dit ‘hysteresis effect’ zorgt er dus voor dat het bottleneck regime langer duurt dan strikt noodzakelijk. In figuur 3.9 worden de verschillende toestandspunten ter hoogte van de bottleneck in een fundamenteel diagram weergegeven. Door deze punten chronologisch met elkaar te verbinden blijkt dat het ontstaan en het opheffen van het bottleneck regime via een ander pad verloopt.



Figuur 3.9 : Fundamenteel intensiteit – snelheids diagram waarbij de opeenvolgende toestands punten met elkaar verbonden zijn.

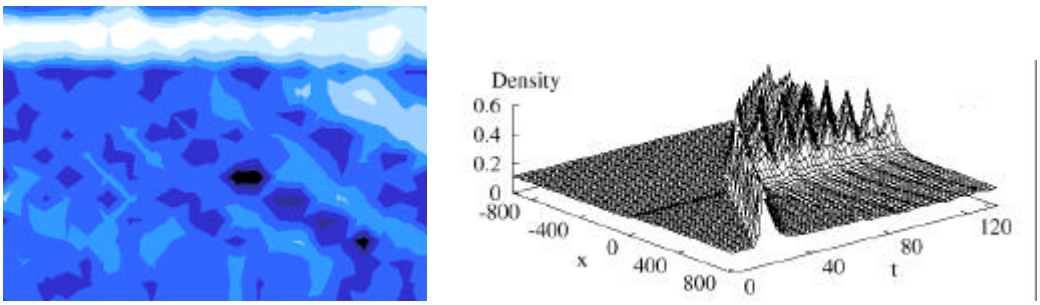
De golven binnen het 'congestie regime' kunnen niet verklaard worden door een eerste orde model. Deze golven ontstaan door kleine verstoringen in de bottleneck en ontwikkelen zich tot grotere golven met sterk variërende intensiteit en snelheid.
De eerste twee congestie golven hebben een periode van tien minuten. Tussen de golven wordt zelfs een 'vrij verkeer' snelheid gehaald. Latere golven hebben lagere snelheden en volgen elkaar sneller op. Karakteristiek voor deze golven is dat ze met dezelfde snelheid tegen de rijrichting in voort bewegen. Bestuurders kruisen deze golven en ervaren ze als een opeenvolging van optrekken en afremmen.
Helbing komt vanuit hogere orde modellen tot verschillende congestie patronen die ook in de tellingen teruggevonden worden :

Triggered Stop-and-Go traffic wordt in figuur 3.10 rechts door Helbing weergegeven, waarnaast links enkele tellingen weergegeven worden.



Figuur 3.10 : Meetgegevens (proefstrook) en overeenkomstig theoretisch filepatroon volgens Helbing.

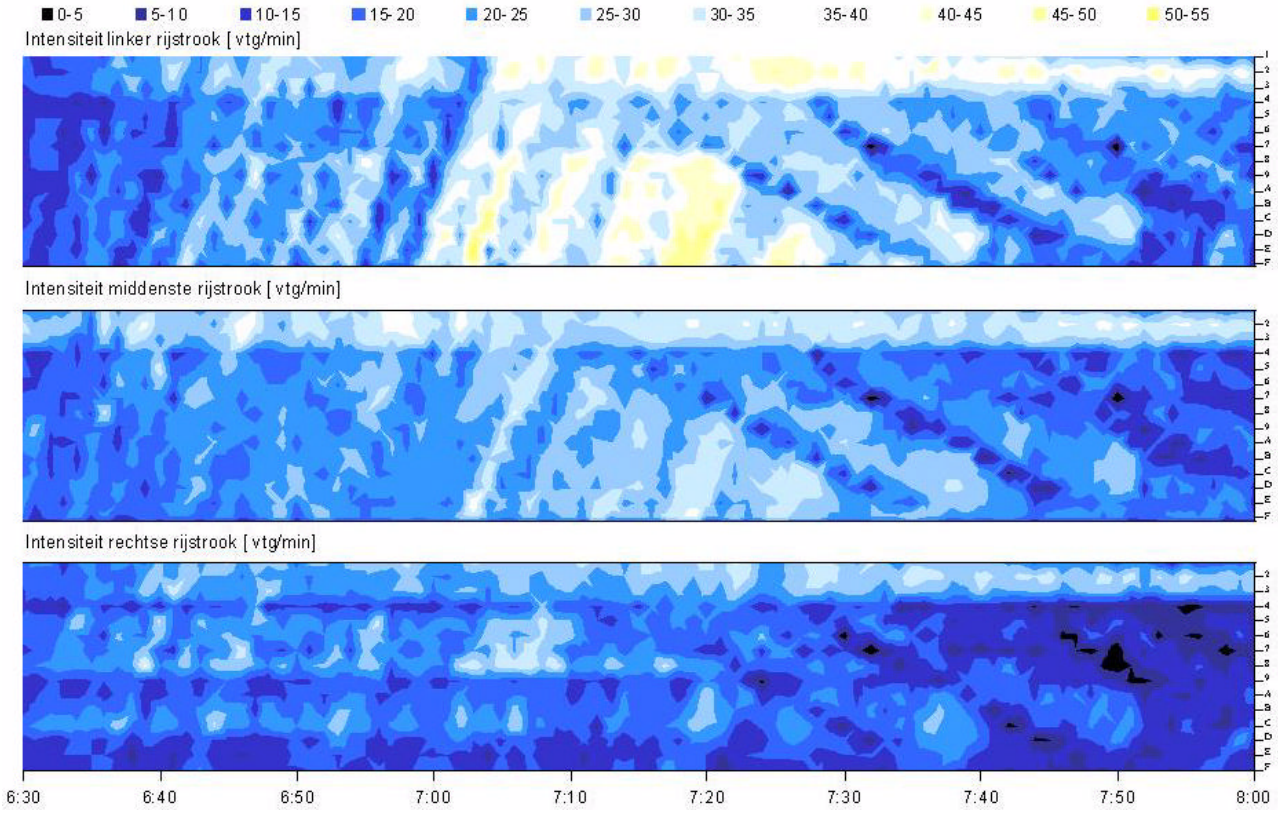
Op figuur 3.11 wordt oscillatory congested traffic weergegeven.



Figuur 3.11 : Meetgegevens (proefstrook) en overeenkomstig theoretisch filepatroon volgens Helbing.

De verschillende factoren die deze filepatronen beïnvloeden zijn, uitgaande van Helbing, gerelateerd aan de verkeersvraag op de hoofdweg, de grootte van de bottleneck (in dit geval de verkeersvraag van de toerit), en de lokale infrastructuur lay-out.

De drie verschillende rijstroken hebben vaak een licht afwijkend gedrag. In figuur 3.12 wordt de intensiteit per rijstrook tussen 6u30 en 8u00 weergegeven. Hieruit blijkt dat de intensiteit op de linkse invoegstrook aanzienlijk hoger is vlak voor congestie start. Dit kan verklaard worden doordat de vrachtwagens niet afzonderlijk gemeten werden. Dit fenomeen wordt door de linkse invoegstrook nog versterkt. Het verschil in intensiteit tussen vrij verkeer en congestie is op deze strook ook het grootst. De intensiteit op de rechterrijstrook is quasi gelijk voor als tijdens congestie.



Figuur 3.12 : Intensiteit voor de drie afzonderlijke rijstroken tussen 6u30 en 8u00.

Bij een lage totale intensiteit, bijvoorbeeld voor 6u45, is de intensiteit op de rechterstrook dan weer groter dan op de linkerrijstrook.

Van 7u50 tot 8u00 is er in het begin van de proefstrook gedeeltelijk vrij verkeer op de rechterrijstrook, terwijl de linkerrijstrook nog congestie kent.

De sprong van congestie naar het vrij verkeer regime, niet weergegeven op de figuur 3.12, gebeurt ook niet gelijktijdig voor de drie rijstroken.

Deze verschijnselen kunnen niet met een eerste orde model beschreven worden. Een eerste orde model gaat immers uit van een homogeen en op elk moment stationaire verkeersstroom. Mogelijke oorzaken die aan de grondslag liggen van deze effecten zouden in een hogere orde model aan bod kunnen komen:

- Autobestuurders reageren vertraagd op een verandering. Door deze reactietijd worden bepaalde verstoringen versterkt.
- Het veranderen van snelheid gebeurt niet symmetrisch. Het remmen en optrekken gebeurt niet even snel.
- De voertuigstroom is niet homogeen. Zo zijn er verschillende voertuigtypes (vrachtwagens trekken langzamer op en hebben een grotere lengte, ...) en verschillende bestuurders. Deze verscheidenheid is de oorzaak van het voorbijsteken op autosnelwegen. De strategie die bestuurders hanteren voor hun rijstrookwisselgedrag is afhankelijk van het verkeersregime. Uitgaande van de ervaringen met blokrijden lijkt homogener verkeer veiliger en wenselijker. Ook het modelleringsproces wordt er een stuk eenvoudiger door.

3.4 Besluit

Meetgegevens van congestie bevatten een schat aan kennis. Om deze kennis toegankelijk te maken dienen verschillende stappen ondernomen te worden. In dit hoofdstuk beschreven we deze stappen. Vooreerst dient het gebied dat onderzocht wordt in kaart te worden gebracht (cfr. proefstrook). Vervolgens dienen de meetgegevens verzameld te worden en worden deze voorbewerkt om corrupte en ontbrekende gegevens te verwijderen. Het laatste deel van dit hoofdstuk werd gewijd aan een analyse van de meetgegevens en het toetsen van de theoriëen aan de meetgegevens van de proefstrook.

4. Inventarisatie DVM maatregelen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van maatregelen die passen binnen dynamisch verkeersmanagement. Deze DVM maatregelen hebben enkele gemeenschappelijke kenmerken. Ze zijn relatief snel toepasbaar en implementeerbaar, ze bespelen de verkeersstromen op een dynamische wijze en geven de wegbeheerder controle-instrumenten om zo de verkeersstroom beter te beheren. Hiervoor is een goed uitgerust monitoringsysteem noodzakelijk.

Eerst worden de verschillende maatregelen kort besproken. Vervolgens komen de mogelijke effecten en kenmerken van de maatregelen aan bod.

4.2 Overzicht DVM maatregelen

De DVM-maatregelen kunnen onderverdeeld worden in verschillende categorieën. Hier wordt een onderscheid gemaakt tussen informatiesystemen, snelheidsbeï nvloeding, toeritdosering, doelgroepmaatregelen, organisatorische, infrastructurele en juridische maatregelen.

4.2.1 Informatiesystemen

Informatiesystemen beogen een betere benutting van het netwerk door de weggebruiker tijdig te informeren over congestie, ongevallen of andere gevaarlijke omstandigheden (mist, sneeuw, enzovoort.). Hierdoor zal de weggebruiker een alternatieve route kunnen kiezen, zijn rijstijl aanpassen, het tijdstip van vertrek of de modekeuze wijzigen.

File-detectiepanelen hebben enkel als taak de weggebruiker te waarschuwen voor congestie, om kop-staartaanrijdingen zo veel mogelijk te vermijden. Deze maatregel wordt toegepast op plaatsen waar geregeld filevorming optreedt en waar het zicht op de staart van de file beperkt is. Andere instructies zoals snelheidsbegrenzing en aanduiding van alternatieve routes, worden hier niet beschouwd. Deze komen later aan bod.
Ook mist-detectiepanelen waarschuwen de weggebruiker voor plots optredend en onverwacht gevaar, in dit geval mist. Met behulp van zichtmeters wordt continu de zichtbaarheid gemeten en via een centrale computer doorgegeven aan de verschillende signalisatiepanelen. Deze panelen kunnen geplaatst worden op plaatsen waar een verhoogde kans op mist is.

Dynamische Route-InformatiePanelen (DRIP’s) zijn panelen langs de weg waarop informatie wordt gegeven over mogelijke routes. De panelen kunnen alternatieve routes aanduiden of ze kunnen voor de verschillende routes informatie geven over de omvang van de congestie of over de reistijd. Hierdoor wordt een betere benutting van het netwerk bereikt, omdat restcapaciteit van minder drukke routes gebruikt wordt. De informatie mag echter niet verwarrend zijn voor weggebruikers die minder vertrouwd zijn met de omgeving.

Naast route-informatiepanelen kunnen ook parkeer-informatiepanelen gebruikt worden. Hierop wordt aangegeven op welke parkings nog parkeerplaatsen vrij zijn en hoe de weggebruiker deze vacante plaatsen best kan bereiken (de zogenaamde P-routes). Samen met een aangepast prijsbeleid kan deze maatregel bijdragen tot een verkeersarm stadscentrum. Analoog kunnen informatiepanelen de reiziger wijzen op mogelijke aansluitingen op openbaar vervoer (= *Park & Ride*-voorzieningen).

Behalve informatie langs de weg bestaan er ook systemen die informatie in het voertuig verschaffen. Radioverkeerinformatie is hiervan de meest verspreide toepassing en bestaat erin de tot dan toe gekende verkeerssituatie mee te delen. De weggebruiker kan deze informatie ontvangen met een gewone FM autoradio. Het *Radio Data System* (RDS) gaat een stap verder door digitale verkeersinformatie met radiogolven uit te zenden. Dit systeem wordt ook wel het *Traffic Message Channel* (RDS-TMC) genoemd. Om dit extra (digitale) signaal te kunnen ontvangen, is een speciale RDS-TMC-decoder in de radio nodig.
In-Car reisgeleidingssystemen geven de weggebruiker informatie over de te volgen route. Bij dynamische systemen wordt de actuele informatie over de verkeerssituatie gebruikt, terwijl statische In-Car systemen enkel de kortste route aanduiden. Deze statische routezoekers hebben echter geen effect op de verkeersafwikkeling.

4.2.2 Snelheidsbeïnvloeding

Door de snelheid van de voertuigen te beïnvloeden wordt getracht de verkeersstroom te homogeniseren. Een homogene snelheid veroorzaakt minder veranderingen van rijstrook (‘wevend verkeer’) waardoor de veiligheid toeneemt, en doet het gemiddelde ruimtegebruik per voertuig verminderen, zodat de intensiteit hoger wordt bij een bepaalde gemiddelde snelheid.

Variable Message Signs (VMS) zijn elektronische panelen waarop een maximumsnelheid wordt weergegeven afhankelijk van de verkeersdrukte. Hierdoor wordt getracht de snelheidsverschillen zoveel mogelijk te beperken. Bij blokrijden wordt de lagere maximumsnelheid opgelegd door een voertuig van de rijkswacht, om zo een homogene verkeerstroom te verkrijgen die knelpunten gemakkelijker passeert. VMS kan beschouwd worden als een vorm van elektronisch blokrijden.

Snelheidsbegrenzing omvat een reeks maatregelen die de bestuurder informeren over zijn huidige snelheid en eventueel de snelheid van het voertuig automatisch aanpassen. Dit kan bijvoorbeeld door een waarschuwingslampje dat oplicht of een actieve tegendruk op het gaspedaal wanneer de maximumsnelheid overschreden wordt. Eventueel kan de motor van het voertuig begrensd worden zodat overschrijden van de maximumsnelheid onmogelijk wordt. Deze maatregelen kunnen statisch in het voertuig ingebouwd worden en zullen dus altijd en over het hele netwerk functioneren. Daarnaast kunnen ze ook dynamisch ingevoerd worden, zowel naar plaats, wanneer deze maatregel enkel op bepaalde plaatsen geïnstalleerd is, als naar tijd, wanneer de maatregel slechts in werking treedt op bepaalde tijdstippen van de dag (= ISA: Intelligente SnelheidsAdaptie).

Bij voertuiggeleiding wordt de rijtaak van de automobilist geheel of gedeeltelijk overgenomen door geautomatiseerde systemen. Een eerste stap is het beï nvloeden van de snelheid, de laatste stap is het nagenoeg volledig overnemen van de rijtaak. In dat geval zijn *dedicated lanes* noodzakelijk waarin enkel de elektronisch gestuurde voertuigen in 'treintjes' voortbewegen.

4.2.3 Toeritdosering

Bij toeritdosering wordt met behulp van verkeerslichten de toegang tot een hoofdweg geregeld. Er treden minder schokgolven op en de reistijdverliezen nemen af voor de gebruikers van de hoofdweg. De frequentie van de groentijd is afhankelijk van de verkeersdrukte op de hoofdweg.

Toeritdosering is er op gericht de doorstroming van het verkeer op het hoofdwegennet te verbeteren. Toeritdosering maakt het mogelijk de file daar te laten ontstaan waar zij de minste problemen veroorzaakt. Hierdoor wordt congestie op de hoofdrijbaan uitgesteld of zelfs vermeden. Op de toerit is voldoende bufferruimte vereist om het onderliggende wegennet niet bijkomend te belasten.

Bij spreidende toeritdosering wordt de verkeersstroom op de toerit druppelsgewijs toegelaten tot de hoofdweg. Het is wel de bedoeling dat de file op de toerit nu en dan volledig verdwijnt zodat het oponthoud voor de toeritgebruikers beperkt blijft.
Men spreekt van beperkende toeritdosering als het verkeerslicht enkel op groen springt wanneer de hoofdrijbaan bijkomend verkeer vlot kan verwerken. Hierdoor wordt de capaciteit van de hoofdrijbaan beter benut. Het kan ook de bedoeling zijn dat het verkeer uitwijkt naar een andere toerit. Verkeer dat gebruik maakt van het onderliggend wegennet om congestie op het hoofdwegennet te vermijden, wordt door de lange wachttijd terugverwezen naar eerdere toeritten.

Wordt toeritdosering op opeenvolgende toeritten – afhankelijk van elkaar –toegepast, dan spreekt men van gekoppelde of gecoördineerde toeritdosering. Naarmate er meer congestie is, wordt er stroomopwaarts meer gedoseerd. Dit is een strategische uitbreiding waarbij het nu de bedoeling is de verkeersafwikkeling op een lang(er) wegvak te verbeteren.

De verschillende strategieën kunnen op één plaats op verschillende tijdstippen toegepast worden in functie van de verkeersstromen op de hoofdrijbaan en op de toerit.

4.2.4 Doelgroepmaatregelen

Bij doelgroepmaatregelen zullen bepaalde groepen weggebruikers bevoordeeld worden door hen aparte rijstroken ter beschikking te stellen of voorrang te verlenen. Bij de keuze van mogelijke doelgroepen kan gedacht worden aan economisch belangrijk verkeer (vrachtverkeer, betalende weggebruikers), aan ecologisch gunstig verkeer (carpoolers) of aan sociaal verkeer (openbaar vervoer).

De beoogde doelgroep moet de voorziening congestievrij kunnen bereiken. Daarom moet de voorziening bij voorkeur tot voor de knelpunten doorgetrokken worden. Fysieke scheiding en controle zal noodzakelijk zijn om fraude tegen te gaan.
Om het doelgroepverkeer doorgang te verlenen moet een speciale rijstrook voorzien worden. Hierbij gaat de voorkeur uit naar een extra rijstrook, dus na uitbreiding van het dwarsprofiel om zo de capaciteit van de weg voor het overige verkeer niet te verminderen. In de praktijk is de plaats die nodig is voor zo een extra rijstrook dikwijls niet voorhanden en zal een inplanting van een doelgroeprijstrook tot gevolg hebben dat het overige verkeer aan wegcapaciteit moet inboeten.

Een *pay-lane* is een rijstrook voorzien voor betalende weggebruikers. De wegbeheerder garandeert op zijn beurt een congestievrije doorstroming op deze rijstroken. Dit kan hij verkrijgen door een aangepast prijsmanagement. De weggebruiker kan dan uitmaken of de reistijdwinst opweegt tegen de extra kosten die hij daarvoor moet dragen.
Een *reserved lane* is een rijstrook die gratis mag gebruikt worden door bepaalde doelgroepen, bijvoorbeeld bussen, vrachtwagens, carpoolers. Ook hier wordt, door een vlotte doorstroming aan te bieden, getracht bepaalde verkeersmodes aan te trekken (en andere achter te stellen). Ook buiten de spits zal een *reserved lane* een positieve invloed hebben op de verkeersveiligheid.
Indien er bij toeritdosering twee rijstroken op de toerit aanwezig zijn of te realiseren zijn, kan een rijstrook aan een doelgroep toegewezen worden. De doelgroep krijgt dan prioriteit of zelfs vrije doorgang bij de dosering. Dit wordt doelgroepdosering genoemd.

Bij rekeningrijden wordt aan elke weggebruiker een toeslag gevraagd. Een variante hierop is het heffen van tol op één knelpunt (tolbrug). Er bestaan nu reeds elektronische voorzieningen die het mogelijk maken dat de betaling zonder fysieke barrières gebeurt, met een zender en ontvanger-systeem zowel in de wagen als langs de kant van de weg. Door rekeningrijden in een corridor toe te passen, voorkomt men bijkomend sluipverkeer. Men kan de prijs laten variëren met de actuele verkeersdrukte, hoewel dit praktisch moeilijker haalbaar is.

4.2.5 Organisatorische maatregelen

Sommige maatregelen vergen enkel organisatorische inspanningen, zonder al te veel technische of elektronische aanpassingen. Een voorbeeld hiervan is *incident management.* Op plaatsen met hoog ongevallenrisico of waar een ongeval veel congestie met zich meebrengt, wordt gedurende spitsperiodes een takeldienst stand-by gehouden. Hierdoor wordt wegversperring tengevolge van een ongeval tot een minimum herleid. De vertragingen die door een incident veroorzaakt worden, nemen immers meer dan evenredig toe met de duur van het ongeval. Een takeldienst alleen is echter niet voldoende: heel het proces van detectie van een ongeval tot verwittiging en inschakeling van de bevoegde instanties (politie, ambulance, takeldienst), dient zo efficiënt mogelijk gemaakt te worden.

4.2.6 Infrastructurele maatregelen

Infrastructurele maatregelen zijn erop gericht de doorstroming op een wegvak te verbeteren door de infrastructuur gericht uit breiden of de vormgeving, inrichting en uitrusting van de weg aan te passen. Een voorafgaande analyse moet uitwijzen of een infrastructurele aanpassing het knelpunt niet gewoon verschuift naar het einde van de doorgevoerde wijzigingen.
Drie voorbeelden in deze categorie zijn spitsstroken, wisselstroken en een dynamisch wegprofiel. Bij spitsstroken wordt de pechstrook tijdens de spits opengesteld als rijstrook. Met behulp van signalisatie wordt de status van de pechstrook aan de weggebruiker duidelijk gemaakt. Het verdwijnen van de pechstrook zal echter de afhandeling van een ongeval bemoeilijken.
Wisselstroken zijn aparte rijbaanvoorzieningen, die eveneens tijdens de spits opengesteld worden, maar de rijrichting is verschillend tijdens ochtend- en avondspits. Om te vermijden dat het verkeer de wisselstrook vanuit de verkeerde richting oprijdt of bij het verlaten van de wisselstrook de verkeerde hoofdrijbaan oprijdt, is een fysieke scheiding tussen de wisselstrook en de beide hoofdrijbanen aangewezen. Deze maatregel is enkel zinvol als er voldoende verschil is in verkeersdrukte van de spits en tegenspits.
Bij een dynamisch wegprofiel wordt vanaf een bepaalde verkeersdrukte het aantal rijstroken vermeerderd. Hierbij wordt de totale breedte van de weg niet gewijzigd en blijft de pechstrook behouden. De meest rechtse rijstrook blijft voldoende breed voor vrachtwagens, de overige rijstroken worden smaller.

4.2.7 Juridische maatregelen

Juridische maatregelen behelzen het uitvaardigen van regels voor alle verkeer, of voor bepaalde voertuigcategorieën. Het al dan niet slagen van dergelijke maatregelen is sterk afhankelijk van de ordehandhaving: gepaste controles en boetes moeten de weggebruikers er toe aanzetten zich aan de regels te houden.
Deze maatregelen kunnen altijd ingevoerd worden, toch is een fijnere afstelling (bijvoorbeeld enkel in de spits) meer aangewezen.

Een inhaalverbod voor vrachtverkeer kan ertoe leiden dat er op de linkerstrook minder vermenging optreedt van voertuigen met verschillende snelheid (dit is uitgaande van de veronderstelling dat vrachtwagens een lagere snelheid hebben dan personenwagens). Deze maatregel verhoogt vooral de veiligheid. Het slagen van deze maatregel wordt bemoeilijkt wanneer veel in- en uitvoegend verkeer te verwachten is.

Keep your lane bestaat erin dat voertuigen op wegen met meerdere rijstroken per richting zoveel mogelijk op hun eigen strook blijven rijden. Daarbij is rechts voorbijsteken toegelaten. De rechterrijstrook zal een hogere bezetting kennen en er zullen minder rijstrookwisselingen voorkomen zodat congestievorming wordt uitgesteld. Nadat de weggebruikers voldoende zijn voorgelicht over de werking van deze maatregel, zal dit ook de kans op ongevallen verminderen.

Het instellen van een minimumsnelheid op de uiterst linkse rijstro(o)k(en), heeft als doel dat relatief langzaam rijdende voertuigen het achteropkomend - met wettelijk toegestane snelheid rijdende – verkeer niet zouden ophouden. Zonder deze maatregel zou er sneller congestie kunnen optreden of kop-staartbotsingen veroorzaakt worden. Op vlakke wegen is het effect eerder gering, op wegen met sterke hellingen heeft het opleggen van een minimumsnelheid meer effect.

4.3 Effecten en kenmerken van DVM maatregelen.

De verschillende DVM maatregelen die hierboven besproken worden, kunnen beoordeeld worden op hun verwachte effecten. Na een kort overzicht van de verschillende criteria, worden de verschillende maatregelen in een overzichtstabel beoordeeld. Ook enkele eigenschappen of kenmerken van de maatregelen worden hier besproken.

4.3.1 Effecten

a) Voorspelbaarheid van de reistijd
   Hiermee wordt indirect de betrouwbaarheid van het transportsysteem en het comfort beoordeeld. Merk op dat een verhoging van de voorspelbaarheid niet noodzakelijk een verkorting van de reistijd betekent.
b) Capaciteitsverhogend
   Met capaciteit wordt hier de maximale intensiteit bedoelt onder optimale omstandigheden.
c) Verhogen linkdoorstroming
   Met de doorstroming wordt de maximale intensiteit bedoelt onder reëele omstandigheden. Zo leidt het homogeniseren van verkeer tot een verhoogde doorstroming, maar blijft de capaciteit hierdoor hetzelfde.
d) Verhogen netwerkdoorstroming
   De maximale intensiteit die van een netwerk gebruik maken onder reëele omstandigheden.
e) Verkleinen reistijd
   Bij doelgroepmaatregelen wordt deze eigenschap afzonderlijk beoordeeld voor het doelgroepverkeer en het overige verkeer.
f) Verbeterde veiligheid
g) Ontlasten onderliggend netwerk
h) Verhogen verkeersaanbod
   Hiermee wordt een verbetering van het transportsysteem bedoeld.
i) Keuzegedrag
   In het traditionele verkeersmodel wordt het keuzegedrag dat leidt tot een verplaatsing, misschien wat kunstmatig, opgesplitst in vier stappen. De invloed van de maatregelen op volgende keuzemomenten wordt nagegaan:
   1. Generatie / tijdskeuze : het al dan niet maken van een verplaatsing en het tijdsstip van vertrek
   2. Distributie : keuze van bestemming en bijgevolg de lengte van de verplaatsing
   3. Modekeuze : keuze van de vervoerswijze
   4. Routekeuze : keuze van de weg waarlangs de verplaatsing gaat.

Merk op dat een verlaging van de verkeersvraag een gevolg is van een andere generatie / tijdskeuze.

Effecten :	a	b	c	d	e	f	g	h	i1	i2	i3	i4
Informatiesystemen												
Filemelding	0	0	0	0	0	++	0		0	0	0	0
Mistdetectie	0	0	0	0	0	++	0		0	0	0	0
DRIP	++	0	0	++	++	0	--	++	0	0	0	
dynamische In-Car Reisgeleiding	++	0	0	++	++	0	--	++	0	0	0	
Parkings	+	0	0	+	+	0	+	+	0	0	0	
OV	+	0	0	+	+	0	+	+	0	0	+	
Radio	++	0	0	++	++	0	-	+	+	+	+	
RDS-TMC	++	0	0	++	++	0	--	+	0	+	0	
Snelheidsbeïnvloeding												
VMS	+	0	+	0	++	++	0	+	0	0	0	0
Blokrijden	+	0	+	0	++	++	0	+	0	0	0	0
snelheidsbegrenzing	+	0	+	0	+	++	0	+	0	0	0	0
Geleiding	++	0	+++	+	+++	+++	+	+++	0	0	0	0
Toeritdosering												
Spreidend	0	0	0/+	0	+	0	--	+	0	0	0	0
Gekoppeld	0	0	0/+	+	+	0	--	+	0	0	0	0
Beperkend	0	0	--/+	0	+	0	---	-/+	0	0	0	
Doelgroepmaatregelen												
pay-lane	+++/ --	0	+++/ --	++/--	++/--	+/-	++/--	++/-	0	0	+	
reserved lane	+++/ --	0	+++/ --	++/--	++/--	+/-	++/--	++/-	0	0		
rekeningrijden	+	0	?	?	++	+	++/--		++	0	++	0
doelgroepdosering	+/-	0	+/-	0	+/-	0	+/-	++/-	0	0		0
Organisatorische maatregelen												
incident management	++	0	++	+	+	+	+	+	0	0	0	0
Infrastructurele maatregelen												
spitsstroken	-	+++	+++	++	++	-	0	++	-	0	-	
wisselstroken	+	+++	+++	++	+++	0	0	++	-	0	-	
dynamisch wegprofiel	-	++	+++	++	++	-	0	++	-	0	-	
Juridische maatregelen												
inhaalverbod vrachtverkeer	+	0	0	0	+	++	0	+	0	0	0	0
keep your lane	0	0	0	0	+	++	0	+	0	0	0	0
minimumsnelheid	0	0	0	0	+	+	0	+	0	0	0	0

4.3.2 Kenmerken

De volgende kenmerken van de verschillende maatregelen worden besproken :

a) Acceptatie
   In hoe verre zijn deze maatregelen zonder maatschappelijke weerstand invoerbaar.
b) Afdwingbaarheid
   Hoe goed worden de maatregelen opgevolgd.
c) Snel ingrijpbaar
   Hoe snel kan een maatregel ingezet worden. Hierbij wordt enkel de tijdsperiode tussen het voorkomen van een verstoring en de reactie van de maatregel op deze verstoring bedoeld. De tijd tot het bereiken van de gewenste situatie wordt hiermee niet beoordeeld.
d) Invloedsperiode
   De invloedsperiode is de duur tijdens dewelke de maatregel een positief effect heeft ten opzichte van de situatie zonder maatregel.
e) Invloedsgebied
   Maatregelen kunnen een locaal (l) tot regionaal (r) effect beogen.
f) Omvang studiedomein
   De maatregelen kunnen bestudeerd worden op verschillende schaalniveaus :
   1. Op 1 knooppunt
   2. Op een reeks knooppunten
   3. Op een netwerk
g) Vereiste aanpassingen
   Bij de implementatie van de maatregel kunnen aanpassingen vereist zijn aan de signalisatie (s), aan de infrastructuur (i) of aan de voertuigen (v).

Eigenschappen :	a	b	c	d	e	f1	f2	f3	g
Informatiesystemen									
filemelding	+++	++	o	m	l	+++	++	+	s
mistdetectie	+++	++	o	m	l	+++	++	+	s
DRIP	+++	+	o	m	r	---	---	+++	s
dynamische In-Car Reisgeleiding	+++	++	o	c	r	---	---	+++	s+v
parkings	+++	++	o	m	r	---	---	+++	s
OV	+++	++	o	m	r	---	---	+++	s
Radio	+++	+	v	c	r	---	---	+++	s+v
RDS-TMC	+++	++	v	c	r	---	---	+++	s+v
Snelheidsbeïnvloeding									
VMS	-	+	o	m	l	0	+++	++	s
blokrijden	-	+	v	u	l	0	+++	++	
snelheidsbegrenzing	--	+	o	m	l	0	+++	++	s+v
	--	+		a	r	0	+++	++	v
Geleiding	?	+++		c	r	0	+++	++	v+i

Toeritdosering									
Spreidend	-	++	o		l	+++	++	+	s
Gekoppeld	-	++	o		r	---	+++	+	s
Beperkend	--	+	o		r	+++	++	+	s
Doelgroepmaatregelen									
pay-lane	-	+++		c	r	+	+++	+	v+i
reserved lane	-	+++		c	r	+	+++	+	v+i
Rekeningrijden	--	+++		m	r	---	+	+++	v+i
Doelgroepdosering	+	+++			r	+++	++	0	v+i
Organisatorische maatregelen									
incident management	++				r	+	++	+++	
Infrastructurele maatregelen									
Spitsstroken	++	+++		c	l	0	+++	++	s
Wisselstroken	+++	+++		c	l	0	+++	++	i
dynamisch wegprofiel	++	+++		c	l	0	+++	++	s
Juridische maatregelen									
inhaalverbod vrachtverkeer	--/+	--		c	l	0	+++	+	
keep your lane	0	-		c	l	0	+++	+	
minimumsnelheid	+	+		c	l	0	+++	+	

4.4 Besluit

In dit hoofdstuk werd een overzicht gegeven van de verschillende maatregelen die passen in het kader van dynamisch verkeersmanagement. Verschillende maatregelen werden besproken als illustratie van mogelijke acties die kunnen ondernomen worden om het fileprobleem in België aan te pakken. We beperkten ons tot de meer geavanceerde dynamische maatregelen welke inspelen op de steeds veranderende verkeerstoestand in de tijd. Het voordeel van deze dynamische maatregelen is hun inzetbaarheid op relatief korte termijn en het feit dat ze de wegbeheerder een controle-instrument bezorgen bij het beheer van de verkeersstromen. Tot slot van dit hoofdstuk werd in tabelvorm een samenvattend overzicht gegeven van de mogelijke effecten en kenmerken van de verschillende besproken maatregelen.

5. Microscopische modellering van de bestaande verkeerssituatie

5.1 Inleiding

Als weergave van de real-time verkeerssituatie werd gekozen voor microscopische modellen. De gemodelleerde verkeerssituatie met een microscopisch model zal dan ook fungeren als de weergave van de werkelijkheid. Bij het uitwerken van regelstrategieën wordt de microscopisch gemodelleerde verkeerssituatie als testomgeving gebruikt.

In het project werd gekozen voor twee commerciële pakketten. Beiden zijn betrouwbaar en hebben een open structuur zodat eigen aanpassingen mogelijk blijven. Een microscopisch model vergt veel invoer. Door twee pakketten te gebruiken met dezelfde invoer, kunnen de modellen getest worden los van de kwaliteit van de invoer.

In tegenstelling met prognosemodellen wordt de verkeersvraag expliciet in herkomst - bestemmingsmatrices als invoer gevraagd. Het opstellen van deze HB matrices wordt in de eerste paragraaf besproken.

Vervolgens worden de twee pakketten, Aimsun en Paramics, bondig besproken en komt het kalibreren en het valideren aan bod.

Tenslotte worden de gemodelleerde verkeerspatronen besproken en vergeleken met de werkelijkheid.

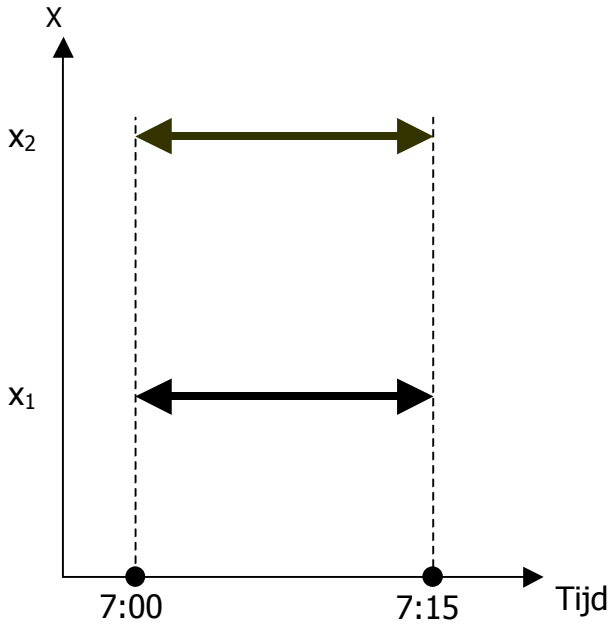
5.2 Dynamische HB tabellen.

In een verkeersmodel wordt het studiegebied in zones ingedeeld. De verplaatsingen worden geacht allen te vertrekken en aan te komen in deze zones. In de herkomst-bestemmingstabel wordt het aantal voertuigverplaatsingen weergegeven dat zich gedurende de studieperiode wil verplaatsen tussen de verschillende zones. In het traditionele macroscopische prognosemodel (het four-step-model) wordt één HB tabel voor de spitsperiode opgesteld. Hiervoor worden eerst uitgaande van socio-economische gegevens (woon- en arbeidsplaatsen,...) het aantal vertrekken (de productie) en het aantal aankomsten (de attractie) van alle zones berekend. Daarna wordt in de distributiefase de producties en de attracties aan elkaar gekoppeld aan de hand van de weerstanden tussen de zones tot een HB tabel. Na de toedeling wordt dit proces herhaald tot het model gekalibreerd is. In de kalibratiefase worden de verkeersstromen in het model en de tellingen met elkaar vergeleken en het model aangepast. In dergelijke prognosemodellen is het aanmaken van een HB tabel een onderdeel van het modelleringproces.

In microscopische modellen dienen verschillende HB tabellen ingegeven te worden. Om de evolutie van het verkeer te zien worden de HB tabellen in kleinere periodes gespecifieerd. De HB tabel voor een bepaalde periode geeft dan het aantal voertuigen weer dat gedurende een bepaalde periode vertrekt. Deze verzameling HB tabellen, ook wel dynamische HB tabellen genoemd, worden expliciet als invoer gevraagd, en vormen dus geen tussenresultaat van het modelleringproces. Het aanmaken van

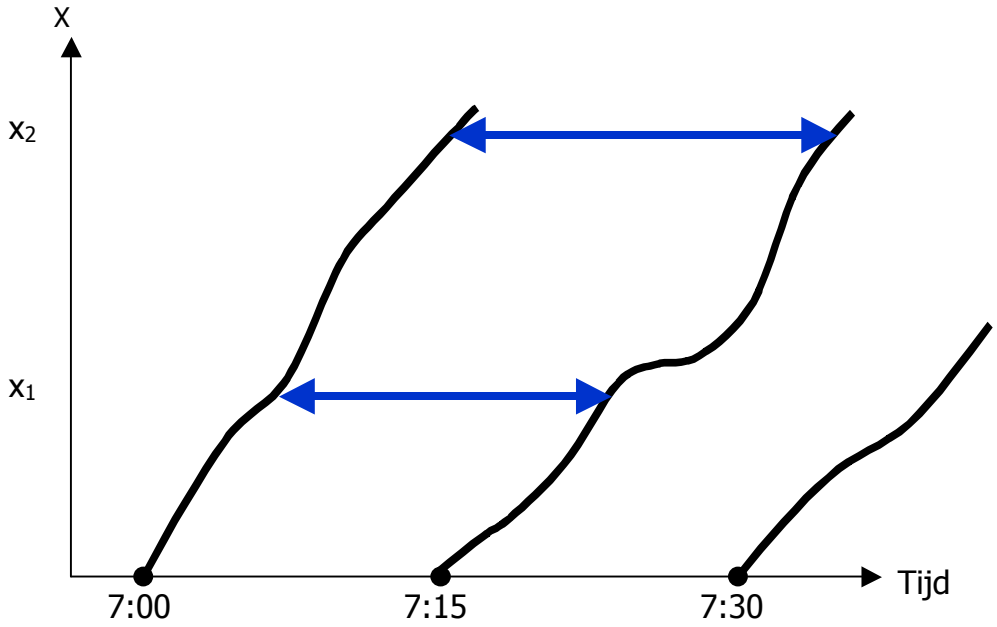
dynamische HB tabellen dient dus vooraf te gebeuren en kan niet met een microscopisch modelleringspakket.

De dynamische HB matrices die opgesteld worden voor de proefstrook worden per 15 minuten opgemaakt op basis van de verkeerstellingen. Doordat enkel tellingen aanwezig zijn van de hoofdweg moeten de verkeersstromen op toe- en afritten berekend worden door de tellingen van opeenvolgende telposten met elkaar te vergelijken. Beschouwen we de tellingen op locatie x_1 en x_2 zoals weergegeven in figuur 5.1, tussen 7u00 en 7u15. In dit geval zijn de hoeveelheden verkeer die gedurende dit tijdsinterval opgemeten worden niet vergelijkbaar met elkaar. Voertuigen hebben namelijk een zekere tijd nodig om de afstand tussen de twee tellocaties te overbruggen.



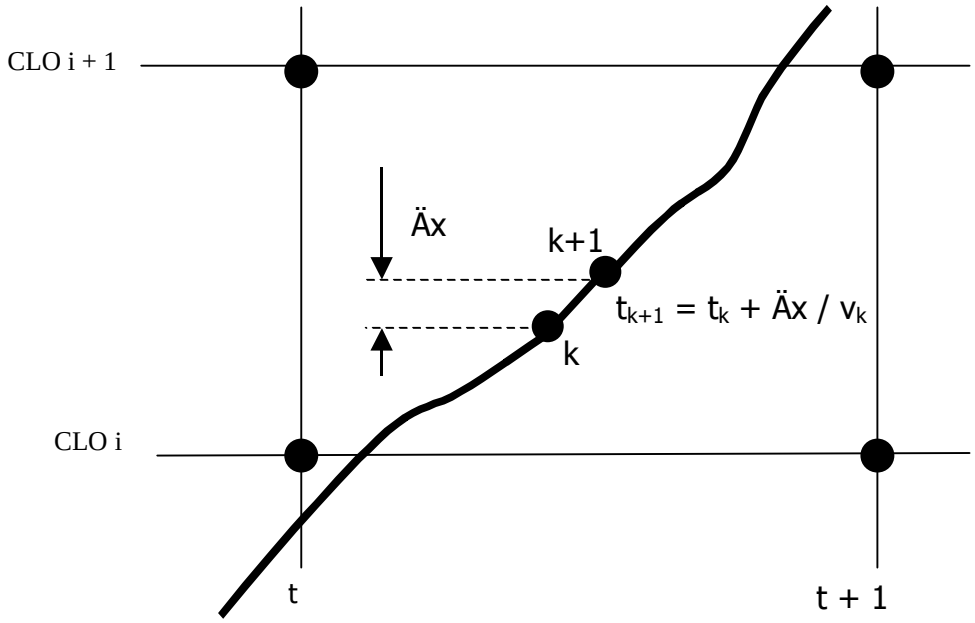
Figuur 5.1 : Tijdsperiodes en meetlocaties.

In figuur 5.2 wordt een trajectorie geschetst van het gemiddelde voertuig dat om 7u00 en 7u15 vertrekt. Hierdoor kunnen deze gemiddelde trajectories als grens fungeren tussen de twee tijdsperiodes. Het aantal voertuigen dat op locatie x_1 tussen deze twee trajectories waargenomen wordt, kan vergeleken worden met de hoeveelheid voertuigen op locatie x_2 die tussen de twee grenstrajectories opgemeten wordt. Deze gemiddelde trajectorie kunnen we beschouwen als een ‘Time moving coordinate system’: een bewegend assenstelsel dat met de snelheid van een gemiddeld voertuig over de weg voortbeweegt. Deze grenstrajectories voor de verschillende tijdsperiodes zijn gemiddelden : snellere voertuigen kunnen naar een vorige periode overgaan door deze gemiddelde trajectorie te kruisen, tragere voertuigen kunnen in een latere periode belanden.



Figuur 5.2 : Tijdsperiodes en meetlocaties met een time moving coordinate system.

Het berekenen van de gemiddelde trajectorie gebeurt op basis van de tellingen op de verschillende tijdsstippen en meetlocaties. Beschouwen we een punt k in de continue t-x ruimte. Doordat de tellingen per minuut gebeuren en op verschillende locaties, kunnen vier meetwaarden in de omgeving van punt k gevonden worden. De snelheid in punt k wordt geï nterpoleerd tussende vier gemiddelde snelheden in de omliggende meetpunten. Op die manier kan voor elk punt een gemiddelde snelheid berekend worden. De waarde van de gemiddelde trajectorie die door dit punt k gaat wordt vervolgens verder berekend door met deze bekomen snelheid en een klein plaatsinterval Δx een volgend punt te berekenen zoals in figuur 5.3 weergegeven.

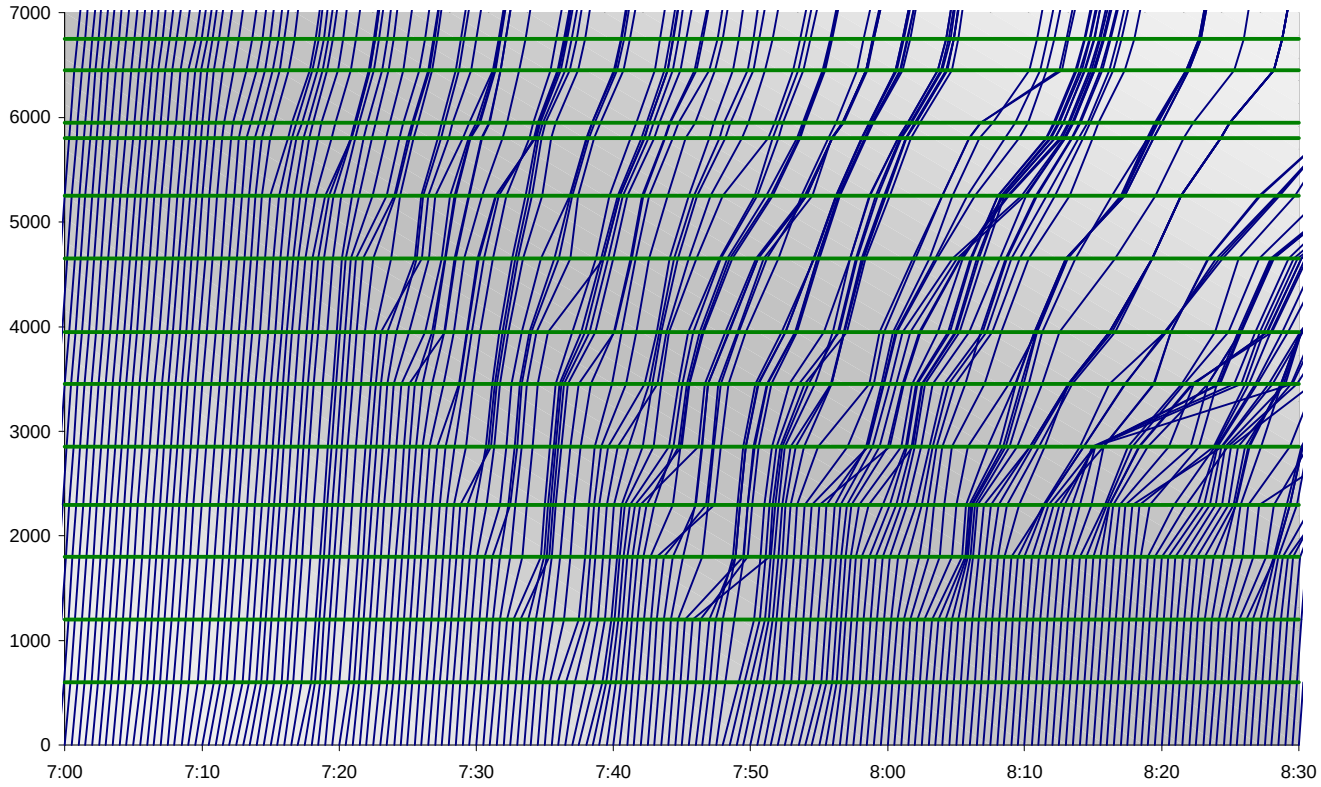


Figuur 5.3 : Berekenen van de gemiddelde trajectorie op basis van de omliggende meetpunten.

Door het tijdsinterval infinitesimaal klein te beschouwen kan deze gemiddelde trajectorie met een integraal uitgedrukt worden in :

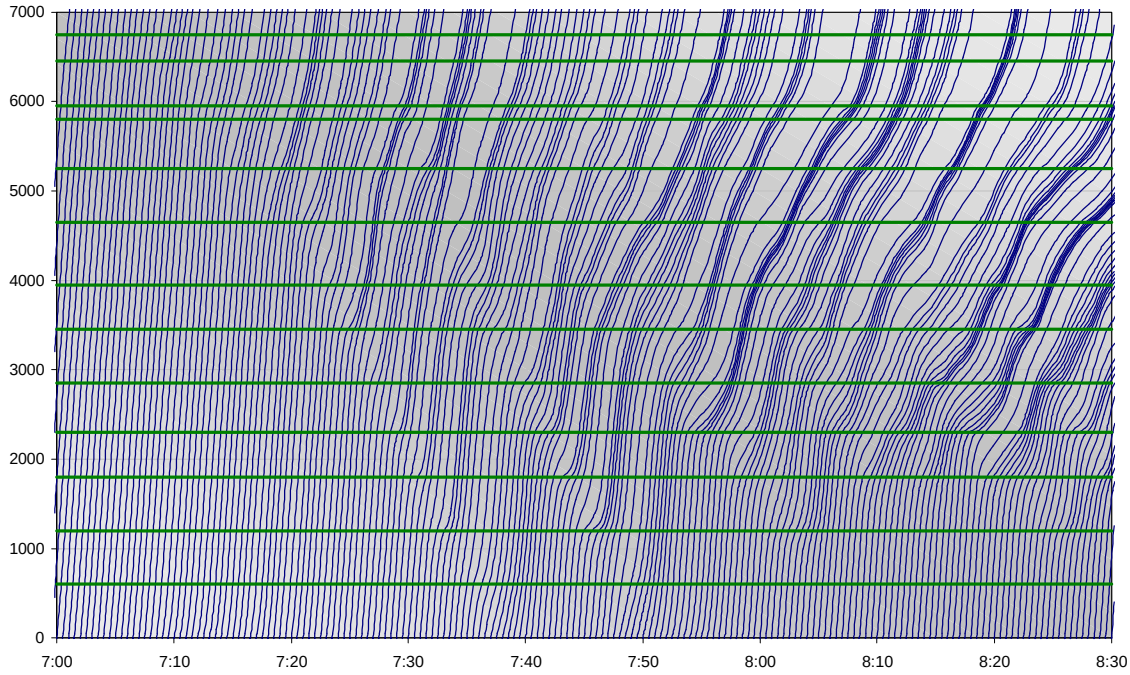
$$t(x,t_i) = \int_0^x \frac{dx}{u(x,t)}$$

Berekenen we nu voor elke halve minuut een gemiddelde trajectorie met Δx gelijk aan de camera-afstand dan bekomen we de set trajectories die in figuur 5.4 weergegeven wordt.



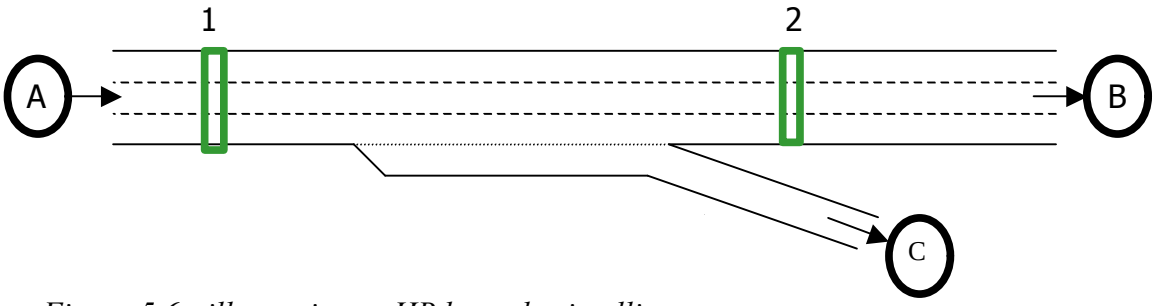
Figuur 5.4 : Gemiddelde trajectories met Dx gelijk aan de camera-afstand.

Doordat het integratie interval gelijk is aan de camera-afstand, worden slechts twee meetpunten beschouwd bij het berekenen van de gemiddelde snelheid. Met deze snelheid wordt dan geëxtrapoleerd tot op de volgende camera-locatie. Op figuur 5.4 zien we dat er gemiddelde trajectories zijn die elkaar kruisen. Dit is natuurlijk onmogelijk, wat erop wijst de het integratie interval Δx te klein genomen werd. Een analoge set trajectories, weergegeven in figuur 5.5, met Δx gelijk aan 50 meter oogt dan ook een stuk realistischer.



Figuur 5.5 : Gemiddelde trajectories met Dx gelijk aan 50 m.

Door het werken met gemiddelde trajectories kunnen de intensiteiten per telpost voor de verschillende tijdsperiodes berekend worden. In figuur 5.6 wordt geï llustreerd hoe de tellingen daarna tot een HB matrix herwerkt kunnen worden. De intensiteit in een periode over detector 1 min de intensiteit in de bijhorende periode over detector 2 geeft het aantal verplaatsingen van zone A naar zone C. Van zone A naar zone B gaan dan de getelde hoeveelheid voertuigen tussen de twee grenstrajectories over detector 2.



Figuur 5.6 : illustratie van HB koppels uit tellingen.

Merk op dat deze methode enkel mogelijk is in een netwerk waar de route tussen twee zones uniek is.

5.3 Overzicht micromodel

Met behulp van twee microsimulatiepakketten, Aimsun en Paramics, is de verkeersafwikkeling op de proefstrook gemodelleerd. De keuze voor deze modellen is gebaseerd op de uitkomsten van de Smartest studie[3], die als basis diende voor het luik microsimulatiemodellen in de adviesgids modellen in appendix A. Aimsun is aan de universiteit van Catalunya ontwikkeld en wordt door TSS aan de man gebracht[4].

Paramics is ontwikkeld aan de universiteit van Edinburgh en wordt nu gecommercialiseerd door Quadstone.[5]. Naast de invoer van de verkeersvraag, onder de vorm van de hierboven beschreven HB tabellen, moet ook de infrastructuur ingegeven worden.

De infrastructuur wordt door knopen en links weergegeven. Een link heeft eigenschappen zoals het aantal rijstroken, maximaal toelaatbare snelheid, ... Op een knoop kan het verkeer van een link naar een andere link overgaan. Hier kunnen verkeerslichten of andere voorrangsregels aan toegevoegd worden.

De bestaande cameradetectoren worden eveneens gemodelleerd. De gemodelleerde detectoren meten het verkeer net zoals de echte detectoren. Op die manier kunnen de modeloutput en de werkelijke verkeerstellingen met elkaar vergeleken worden.

Naast de verkeersvraag en infrastructuur zijn er een groot aantal parameters in een microscopisch model. Al deze parameters kunnen aangepast worden om het verkeerspatroon zo realistisch mogelijk te modelleren. De aanpassing van deze parameters wordt het kalibratieproces genoemd.

De kalibratiefase omvat in eerste instantie het analyseren van de gevoeligheid van de verschillende parameters. Dit gebeurt door het model te laten lopen met enkel een verschil in de waarde van 1 parameter. Wanneer blijkt dat de modeloutput nauwelijks beï nvloed wordt door de verandering van de waarde van een bepaalde parameter, spreken we van een ongevoelige parameter. Ongevoelige parameters worden op de standaardwaarde ingesteld en in het verdere kalibratieproces ongemoeid gelaten.

Microscopische modellen zijn stochastisch. Dit wil zeggen dat er een toevalsfactor in deze modellen ingebouwd zit. Hierdoor is het noodzakelijk ook het toeval in rekening te brengen bij het onderzoeken van de invloed van een parameter. Zo kan het verkeerspatroon in twee verschillende ‘runs’ met dezelfde parameters licht verschillen door de toevalsfactor.

De meest gevoelige parameters worden daarna aangepast tot het werkelijke verkeerspatroon en het gemodelleerde verkeerspatroon zo goed mogelijk met elkaar overeenstemmen. Bij het vergelijken van de verkeerspatronen wordt expliciet gestreefd naar een correcte modellering van de dynamische karakteristieken van het verkeer wat het gebruik van dynamische modellen verantwoord.

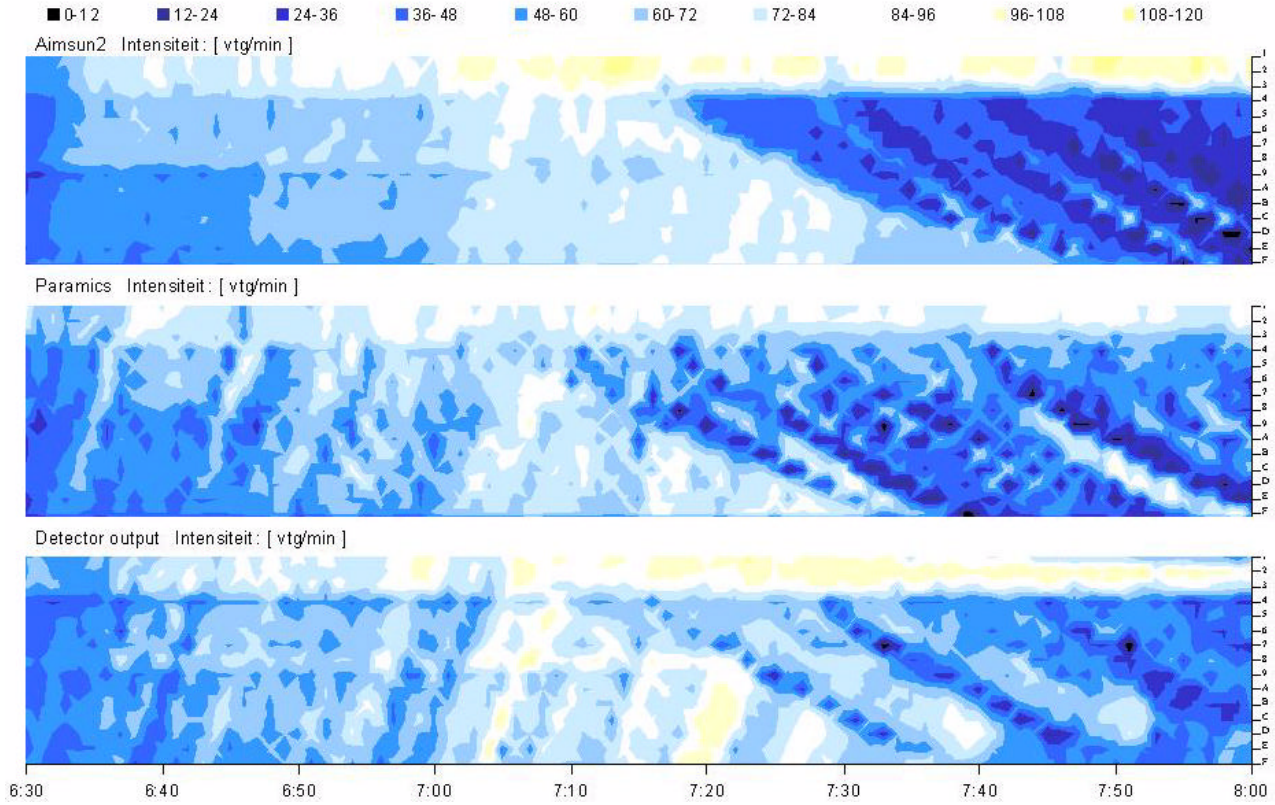
In Aimsun blijkt vooral de rekenstap, die in de versie 3 van Aimsun automatisch gelijkgesteld werd met de reactietijd, de grootste gevoeligheid te vertonen.

In Paramics heeft de signposting de grootste gevoeligheid. Dit is de afstand die een voertuig waarschuwt voor een veranderende infrastructuur en verantwoordelijk is voor het rijstrookwisselgedrag.

Tijdens de validatie fase werden de meetresultaten van een andere dag tot HB matrices bewerkt en werd met de gekalibreerde parameters het model opnieuw geanalyseerd.

5.4 Het gemodelleerde verkeerspatroon.

De verkeerspatronen van de modellen en van de detectoren kunnen met elkaar vergeleken worden. De resultaten van de gekalibreerde modellen (Aimsun, Paramics) en de echte verkeerstellingen worden in de figuren 5.7 tot en met 5.10 weergegeven.

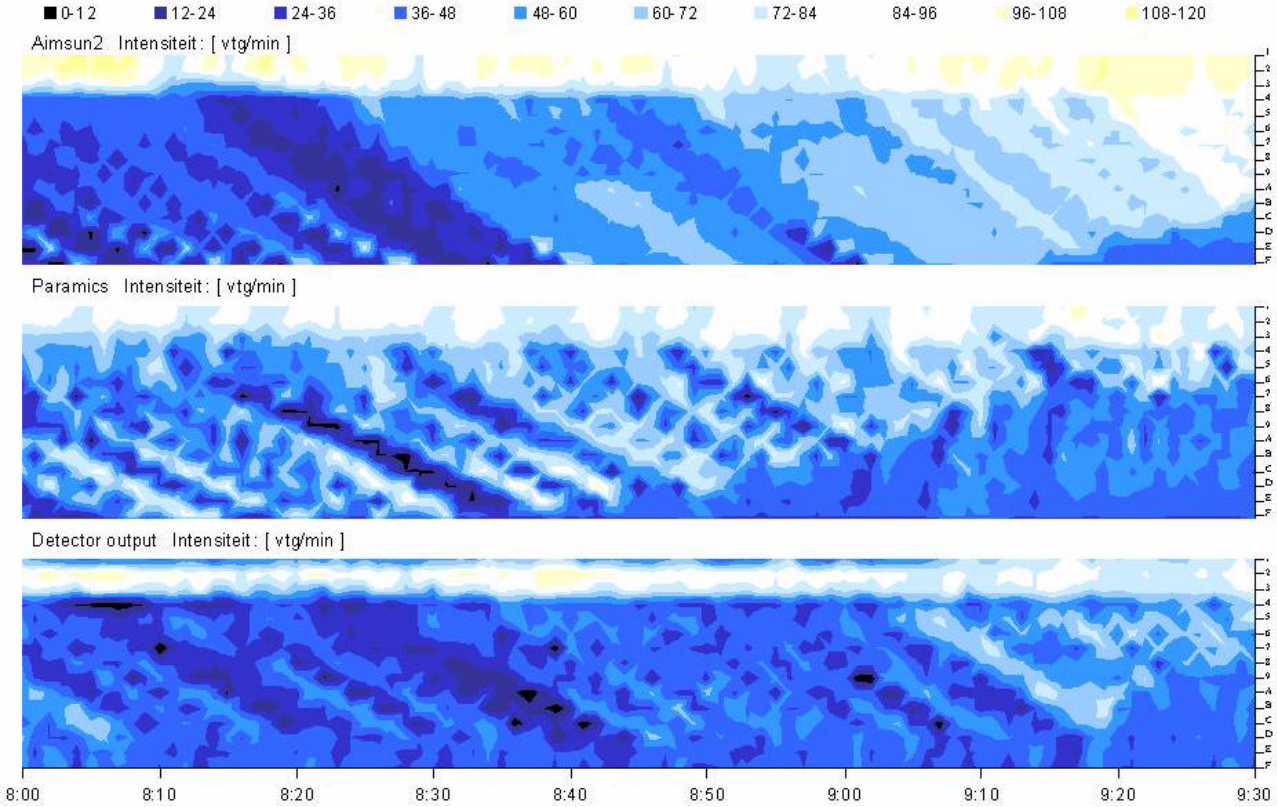


Figuur 5.7: De intensiteit [vtg/minuut] voor Aimsun, Paramics en de detectoren tussen 6u30 en 8u00.

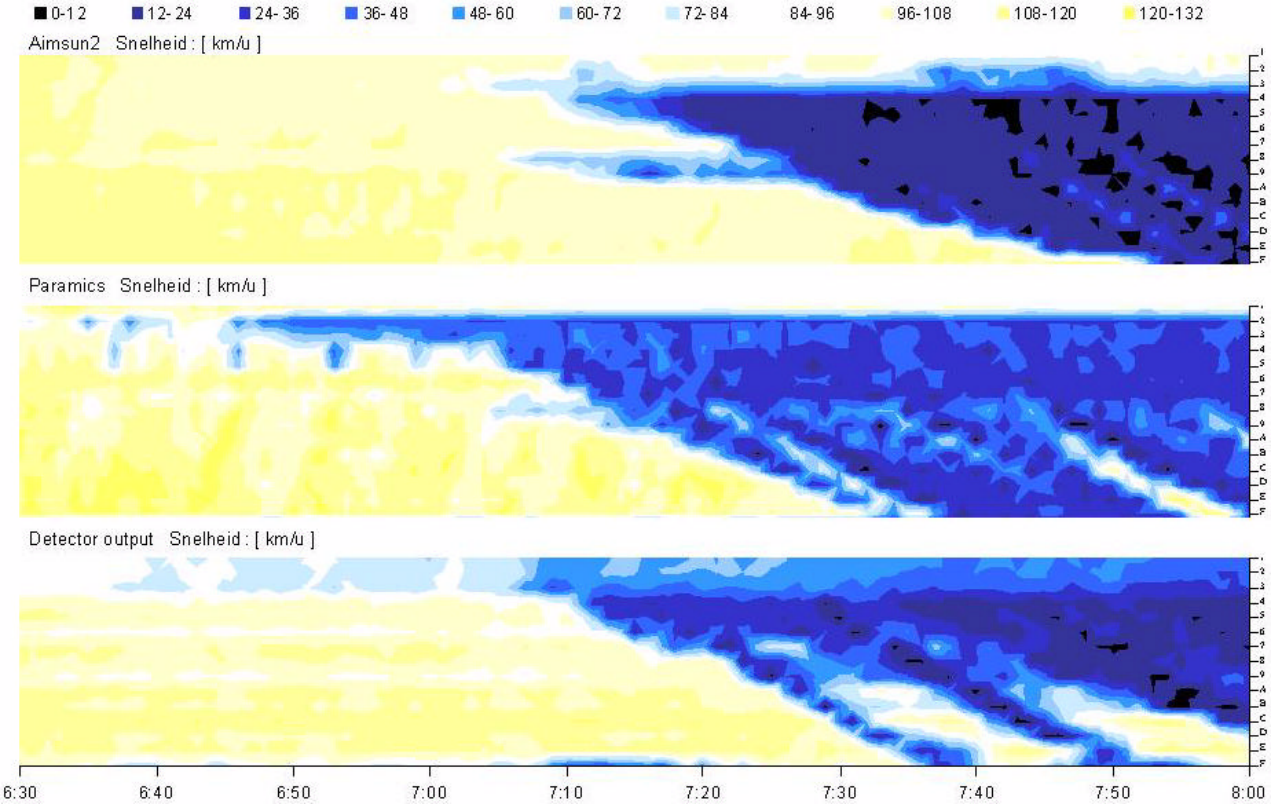
De bespreking van de gemodelleerde verkeerspatronen gebeurt zoals de bespreking van het werkelijke patroon in hoofdstuk drie.

- Eerste Orde

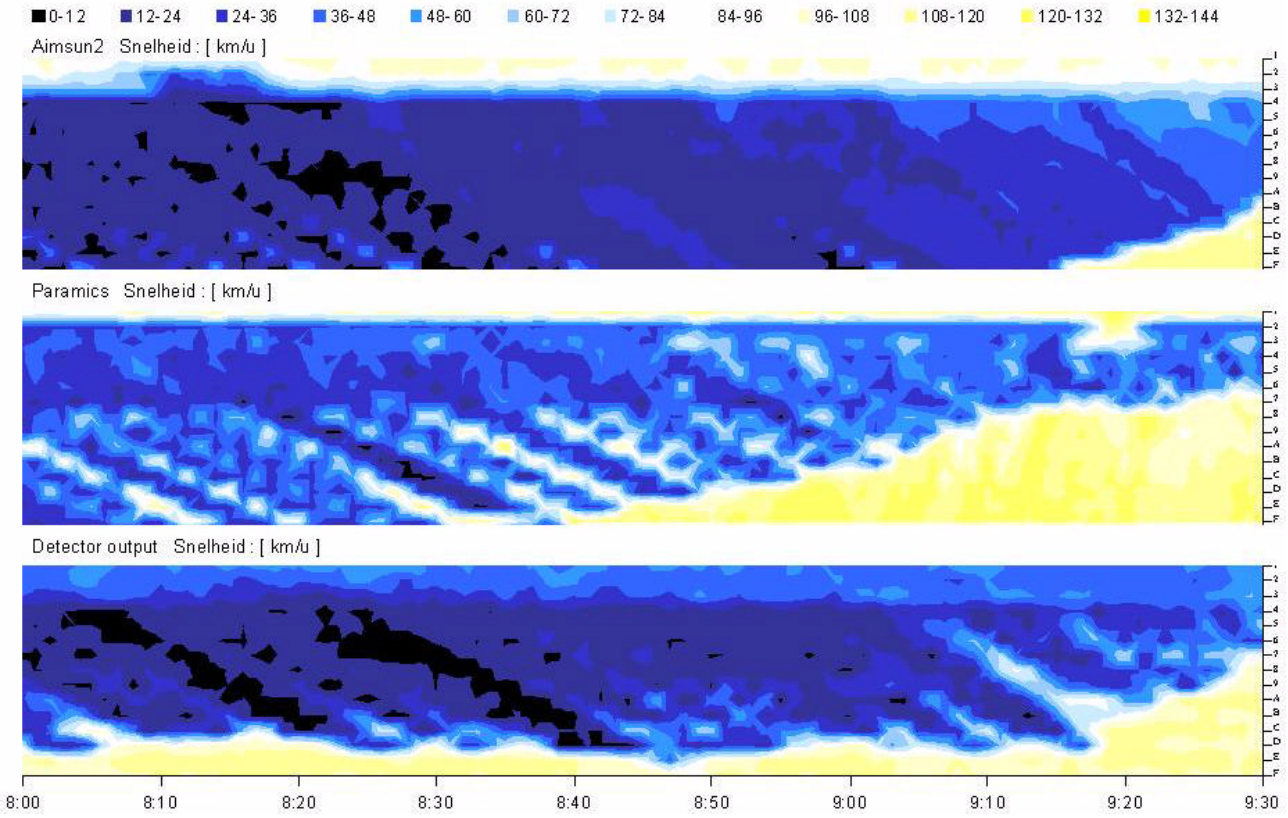
Een vergelijking van de patronen leert dat beide microsimulatiepakketten in staat zijn de eerste orde effecten correct te modelleren. De perturbaties in de verkeersvraag veroorzaken golven in het ‘vrij verkeer regime’ die zich met de rijrichting mee voort verplaatsen. Aimsun heeft iets minder perturbaties en vertoont een ‘vlakker’ vrij verkeer regime. De overgang naar het ‘capaciteits regime’ gebeurt op dezelfde lokatie en hetzelfde tijdsstip. In Paramics is de snelheid ter hoogte van de bottleneck al een tijdje gekelderd, maar treedt de bottleneck op het juiste ogenblik in werking. Bij Aimsun is de snelheid ter hoogte van een opwaartse toerit al iets eerder gestremd.
De opbouw van het congestie regime gebeurt op een gelijklopende manier. Deze eerste congestiegolf plant zich voort tegen de rijrichting in met een gelijkopgaande snelheid.



Figuur 5.8: De intensiteit [vtg/minuut] voor Aimsun, Paramics en de detectoren tussen 8u00 en 9u30.



Figuur 5.9: De snelheid [km/uur] voor Aimsun, Paramics en de detectoren tussen 6u30 en 8u00.



Figuur 5.10: De snelheid [km/uur] voor Aimsun, Paramics en de detectoren tussen 8u00 en 9u30.

De globale congestie kenmerken worden goed weergegeven : de file duurt even lang en de filelengte is gelijk.
Deze modellen zijn dus in staat een, vanuit eerste orde bekeken, correct verkeerspatroon weer te geven.

- Hogere orde

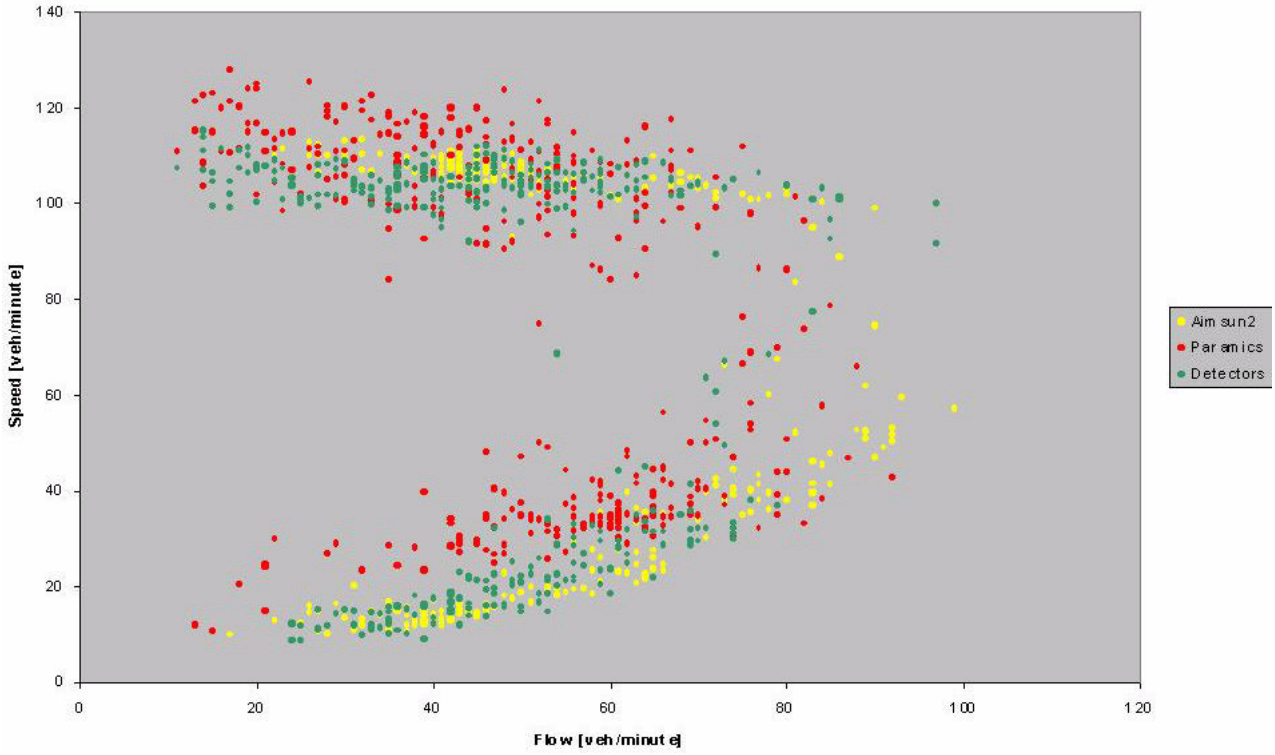
Zowel in Aimsun als in Paramics zijn enkele hogere orde effecten terug te vinden.

In het ‘congestie regime’ worden start-en stop golven gemodelleerd. De aanwezigheid van deze golven op het juiste ogenblik en de juiste locatie is mooi meegenomen. De exacte positie, de juiste periode tussen de golven en de exacte amplitude worden niet altijd goed gemodelleerd.
Dit valt te verantwoorden vanuit de stochastische natuur van de modellen en het werkelijke verkeer. De kenmerken van de start- en stopgolven worden namelijk door uiterste waarden bepaald en niet door de gemiddelde waarde van een grootheid. De aanwezigheid van een specifiek voertuig op een bepaalde locatie en tijdstip zorgen soms voor een drastische invloed op het verkeerspatroon.
Deze hogere orde golven zullen dus nooit goed gemodelleerd kunnen worden met de op onze autowegen beschikbare invoer. Uitgebreidere gegevens van zowel voertuig als bestuurder, te samen met betere omgevingskenmerken, zoals weer, zouden dit in de toekomst misschien mogelijk maken.

Anderzijds is het de vraag of het de bedoeling van verkeersmodellen is om een exacte voorspelling van start-en-stopgolven te willen maken. Deze golven komen vaak voor, maar variëren van dag tot dag, net zoals ook de verkeersvraag dat doet. In dat opzicht is het voldoende dat het fenomeen start-en-stop golven kan gemodelleerd en voorspeld worden, zonder daarom meer nauwkeurige kenmerken er te van willen weten.

De intensiteit door de bottleneck is tijdens congestie lager dan de maximale capaciteit tijdens het vrij verkeer regime. De capaciteit van dit bottleneckregime hangt voornamelijk af van het aandeel invoegende voertuigen. Het rijstrook wisselgedrag is in beide modellen vrij dominant. Ook in de werkelijkheid zou dit zo kunnen zijn.

In figuur 5.11 worden de verschillende minuutwaarden van de intensiteit en de gemiddelde snelheid tegenover elkaar uitgezet voor de detector CLO 5. In figuur 5.12 werd dit nog eens overgedaan voor CLO 2, de detector ter hoogte van de bottleneck. In beide figuren kan een gelijkenis met het fundamenteel q-u diagram gezien worden.

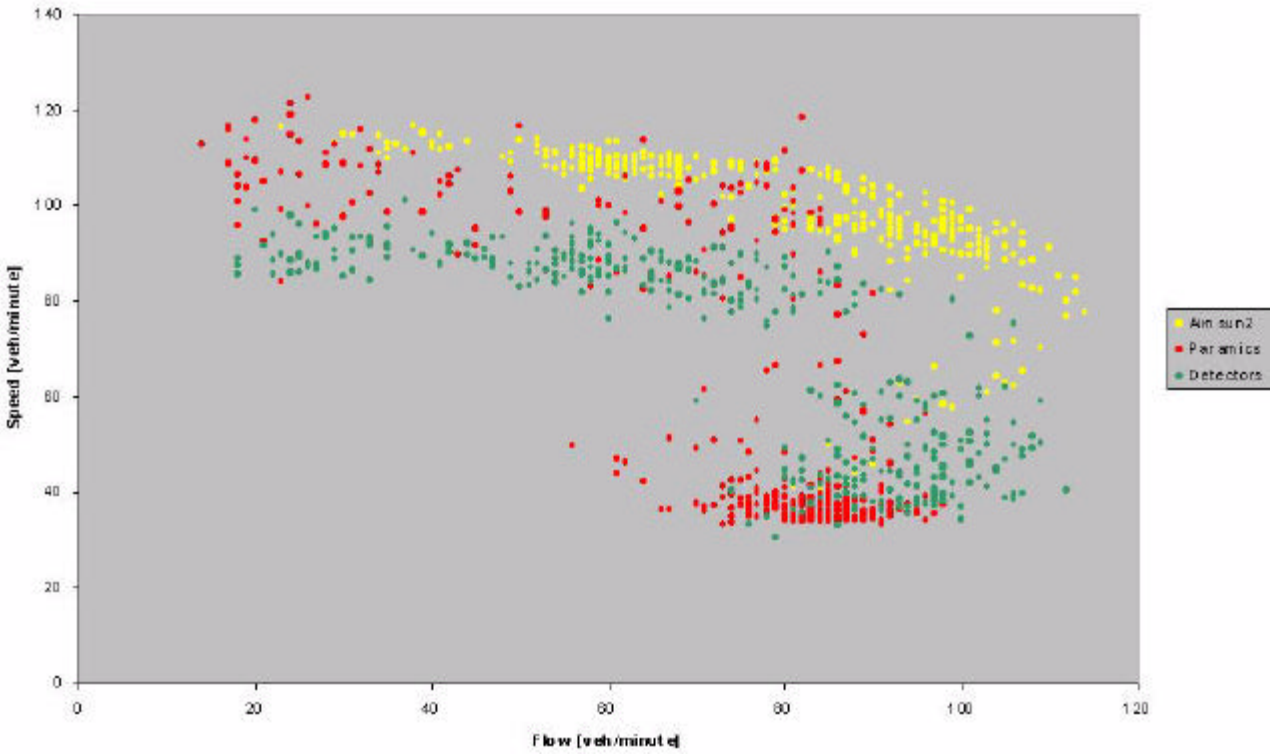


Figuur 5.11 : Intensiteit – snelheidsdiagram voor detector CLO5 in de modellen en tellingen.

Bij de opwaartse detector CLO 5 wordt de capaciteit niet bereikt en dat zowel met de modellen als in de tellingen. De toestandspunten komen goed met elkaar overeen.

Op de bottleneck locatie is de snelheid gedurende het vrij verkeer regime in zowel Paramics als Aimsun lichtjes overschat. De toestandspunten in het capaciteitsregime zijn in Paramics meer aan elkaar geklit. Dit wijst op een stabielere stroom en minder golven ter hoogte van de bottleneck locatie. Ter hoogte van CLO5 zijn de toestandspunten meer verspreid, wat wijst op groeiende golven in Paramics.

Met Aimsun ligt de snelheid in het capaciteitsregime iets hoger. Dit kan er op wijzen dat het filefront iets meer stroomopwaarts gelegen is. Zowel in de CLO5 als CLO2 gegevens blijkt dat de Aimsun gegevens dichter bij een mogelijke curve liggen. Ze benaderen als het ware het fundamentele diagram beter dan Paramics en de werkelijke



Figuur 5.12 : : Intensiteit – snelheidsdiagram voor detector CLO5 in de modellen en tellingen.

tellingen.

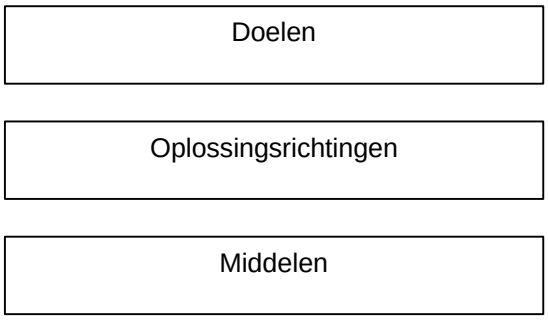
5.5 Besluit

Voor de gedetailleerde simulatie van verkeerssituaties, bijvoorbeeld om de impact van maatregelen in te kunnen schatten, werd gekozen voor microscopische modellen. Om deze modellen te kunnen gebruiken voor de simulatie van verkeerstoestanden dienen we dynamische HB matrices te berekenen op basis van de beschikbare meetgegevens. Deze HB matrices dienen als invoer voor de microsimulatiemodellen. In dit project kozen we voor twee simulatiepakketten met een open en flexibele structuur: Aimsun en Paramics. De performantie van beide modellen werd vergeleken en de simulatieresultaten werden naast de werkelijke meetresultaten van de E17 gelegd. Zowel eerste als hogere orde effecten die in de meetresultaten voorkomen, konden worden teruggevonden in de simulatieresultaten van zowel Aimsun als Paramics.

6. Modelgebaseerde verkeersregeling

6.1 Inleiding

In het onderzoeksdomein van de verkeerscontrole of de verkeersbeheersing kunnen we een gelaagde structuur onderscheiden (zie figuur 6.1). Deze gelaagde stuctuur komt overeen met verscheidene hiërarchische niveaus. We vermelden eerst kort deze niveaus en gaan er vervolgens dieper op in.



Figuur 6.1 : Schematisch overzicht van de hiërarchische structuur van het verkeersbeheersingsmodel.

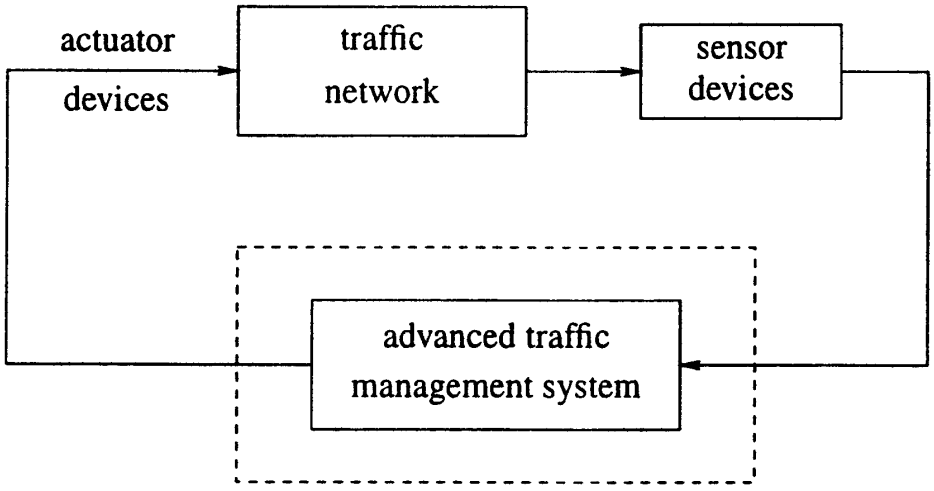
Bij het vastleggen van de *doelen* van het verkeersregelsysteem wordt een antwoord geformuleerd op de vraag: "*WAT willen we bereiken?"*. Het antwoord op deze vraag wordt gegeven op beleidsniveau en volgt rechtstreeks uit de beleidsdoelstellingen. Er wordt onder andere een inventarisatie gemaakt van alle doelstellingen en van de organisaties die belang hebben bij de kwaliteit van de verkeersafwikkeling. Vervolgens wordt eveneens een prioriteit toegekend aan elk van de doelstellingen. Een ondubbelzinnige definitie van de prioriteiten van de te bereiken doelstellingen en een quantifiëring hiervan leidt tot het opstellen van een kostfunctie die later nog gebruikt wordt in het regelproces. We bespreken de kostfunctie later in meer detail.

Eens de doelen vastgelegd worden *oplossingsrichtingen* gedefinieerd. Deze geven een antwoord op de vraag: *"HOE willen we de doelstellingen bereiken?"*. De te volgen strategieën worden geï nventariseerd. Er wordt een lijst opgesteld van de mogelijke te nemen maatregelen om de situatie te beï nvloeden. In hoofdstuk 4 werd een inventarisatie gemaakt van de verschillende dynamisch verkeersmanagement strategieën. Aan het eind van dit hoofdstuk geven we een illustratie van optimale toeritdosering.

Tot slot is er de laag van de *middelen* als antwoord op de vraag: *"Waarmee willen we de doelstellingen bereiken?"*. We bespreken dynamisch (geavanceerde) verkeermanagement systemen (DVM systemen) en hoe deze gebruik maken van actuatoren, sensoren, modellen en optimalisatie in het kader van modelgebaseerde regeling.

6.2 Verkeersregeling

Het opstellen van een dynamisch verkeersmanagement systeem voor optimale verkeersregeling op snelwegen vereist de definitie van een optimale strategie (cfr.doelen) die eenduidig kan vertaald worden in een kostfunktie. Verkeerstellingen geven informatie over de toestand van het verkeer op de snelweg. Daarnaast is het onontbeerlijk om te weten hoe bepaalde maatregelen de verkeerstoestand beï nvloeden. DVM systemen gebruiken wiskundige modellen en simulaties om de impact van de verschillende maatregelen op de verkeersafwikkeling zo goed mogelijk te beschrijven. Deze *modelgebaseerde* aanpak steunt op drie belangrijke componenten: sensoren, modellen en actuatoren. We beginnen met een korte bespreking van deze drie componenten. In figuur 6.2 zien we hoe een DVM systeem interageert met het verkeersnetwerk met behulp van sensoren en actuatoren.



Figuur 6.2 : Schema van een dynamisch geregeld verkeerssysteem. De verkeersstromen worden gecontroleerd door een DVM systeem (ATMS). Voor een schema van een DVM systeem verwijzen we naar figuur 6.4.

6.2.1 Sensoren

Sensoren zijn noodzakelijk om de verkeersgegevens te verzamelen die gebruikt worden om het verkeersmodel op te stellen en te valideren (dit is: na te gaan of het gedrag voorspeld door het model goed genoeg overeenkomt met het gedrag van het werkelijke systeem).

Om een goed beeld te krijgen van de verkeerssituatie zijn meerdere verkeersparameters nodig: de bezettingsgraad, de verkeersdichtheden (het aantal voertuigen per rijstrook en per uur), gemiddelde snelheden, … Deze grootheden kunnen rechtstreeks worden gemeten of kunnen worden afgeleid van de output van lusdetectoren, camera's en pneumatische detectoren. Naast deze verkeersgegevens zijn ook bijkomende gegevens van belang, namelijk: historische verkeersgegevens,

weerssituaties, dagtype (werkdag, weekend, vakantie, evenement, …), uur van de dag (ochtendspits, …) enzovoort. Verder kan ook informatie worden gebruikt afkomstig van visuele inspectie van het snelwegennet (mbv camera's) zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van files op bepaalde wegsecties. Een uitgebreidere bespreking van de meetgegevens, hoe deze verwerkt worden en welke sensortechnologieën in België courant zijn is te vinden in deel 3.2 van dit rapport.

6.2.2 Modellen

Eens de input en output gegevens beschikbaar zijn, kunnen we een model ontwikkelen dat een dynamisch verband definieert tussen input en outputgegevens. Dit model kan een wiskundig model zijn (uitgedrukt door een set wiskundige vergelijkingen), een computermodel of een combinatie van beide.
Een belangrijk aandachtpunt bij de keuze van een model is de afweging die dient gemaakt te worden tussen de nauwkeurigheid van het model en de rekencomplexiteit. In het algemeen kunnen we als vuistregel aannemen dat hoe gedetailleerder een model is, hoe groter de (reken)complexiteit en hoe minder we analytisch kunnen zeggen over de eigenschappen van het model. Er zijn vele verschillende modellen voor verkeerssituaties. Alleen al in dit project kwamen meerdere modellen aan bod. Er werd gebruik gemaakt van de microsimulatiemodellen (computermodellen) Paramics en Aimsun2, maar ook van de (wiskundige) macroscopische modellen van Lighthill, Whitham, Richards en Payne.

De verkeersmodellen worden voor verscheidene doeleinden gebruikt: om een voorspelling te maken van toekomstige verkeerssituaties, om de impact van bepaalde regelacties te onderzoeken (bvb. Voor een 'wat-als' analyse of een 'worst-case' analyse), om een stabiliteitsanalyse te maken van bepaalde regelstrategieën (bvb. Als bepaalde afwijkingen optreden, zal de fout dan doorheen het systeem propageren of uitsterven? Dit is van groot belang bij modelgebaseerde controle daar er onvermijdelijke verschillen zullen zijn tussen het model en het werkelijke systeem), om een optimale regelstrategie te bepalen, rekening houdend met een kostfunctie en gebruik makend van een optimalisatiealgortime, … Het is duidelijk dat voor de meeste probleemstellingen binnen de context van modelgebaseerde controle zoals we die hier bekijken we tijdsvariante (niet-statische) modellen dienen te gebruiken met parameters die geregeld worden aangepast op basis van verkeersmeetgegevens die worden verstrekt door de sensoren zoals hierboven beschreven.

6.2.3 Actuatoren

Eens we een geldig model hebben dat de verkeerssituaties voldoende nauwkeurig beschrijft, kunnen we pogen de performantie van het verkeerssysteem te optimaliseren. Dit vertaalt zich in het zoeken naar inputs aan te leggen aan het systeem die ervoor zorgen dat het verkeerssysteem een voorafgedefinieerd gedrag vertoont. Hiervoor hebben we actuatoren nodig die de mogelijkheid bieden rechtstreeks op de verkeerssituatie in te grijpen. Volgende actuatoren kunnen we onderscheiden voor een verkeerssysteem bestaande uit een snelwegennetwerk:

- 'Stuur' het gedrag van de weggebruikers door hen te voorzien van verkeersinformatie. Deze informatie omvat de traditionele opsomming van incidenten en verkeersopstoppingen maar daarnaast kan ook informatie worden

verstrekt over de voorspelde duur van de files en mogelijke alternatieve routes. De verkeersinformatie kan aan de bestuurders worden aangeboden via volgende systemen: dynamische informatiepanelen, RDS/TMC (Radio Data System / Traffic Message Channel) of zelfs door infrarode bakens langs de weg.

- Het gebruik van panelen met variabele boodschappen ('variable message signs') om de weggebruikers te informeren over gepaste snelheden (snelheidsharmonisatie) of om trachten het verkeer te herverdelen over alternatieve routes.
- Toeritdosering bestaat uit een verkeerslicht dat aan de oprit van een snelweg de stroom voertuigen dat de snelweg oprijdt regelt. De hoeveelheid voertuigen die toegelaten wordt de snelweg op te rijden is afhankelijk van de verkeersdichtheid op de snelweg. Het idee achter toeritdosering is te trachten het verkeer op de snelweg steeds vlot te houden. We geven aan het eind van dit hoofdstuk een illustratie van de werking van toeritdosering.
- Een rijstrook die in beide richtingen kan gebruikt worden. Afhankelijk van de verkeersvraag in een bepaalde richting wordt deze rijstrook opgengesteld voor het verkeer in een bepaalde richting.

Een uitgebreidere bespreking en inventarisatie van de actuatoren is te vinden in hoofdstuk 4 dat handelt over DVM maatregelen.

6.3 Modelgebaseerde regeling

De kerngedachte van modelgebaseerde regeling is de volgende: vertrekkend van een specificatie schrijven we een kostfunktie neer die een maat is voor de performantie van het systeem (hoe lager de waarde van de kostfunktie, hoe beter de performantie van het systeem). Deze kostfunktie dient geoptimaliseerd (geminimaliseerd) te worden rekening houden met het gedrag van het systeem. Dit gedrag van het systeem, dat beschreven wordt door het systeemmodel, legt beperkingen op betreffende de realiseerbare toestanden van het systeem. Dit resulteert in een optimalisatieprobleem met beperkingen waarvoor analytische en numerieke (optimalisatiealgoritmen) oplossingsmethoden bestaan.

In wat volgt in deze paragraaf bespreken we eerst het opstellen van een kostfunktie om vervolgens de toepassing van modelgebaseerde controle in DVM systemen voor snelwegennetwerken in detail uit te werken.

6.3.1 Kostfunktie

Uit de "doelen" afkomstig van het verkeersbeleid en uit de prioriteiten toegekend aan deze doelen kan een kostfunktie worden afgeleid. Deze kostfunktie is een rechtstreekse doorslag van de beleidsdoelstellingen. De kunst bestaat erin elke van de vooropgestelde doelstellingen te vertalen en te kwantiseren in funktie van toestanden van de werkelijke verkeerssituatie / toestanden van het model. We illustreren dit met een voorbeeld:
Een mogelijke doelstelling zou kunnen zijn dat de globale doorstroming doorheen het gehele netwerk maximaal moet zijn. Het is aan te tonen dat deze doelstelling equivalent is met het minimaliseren van de totale tijd gespendeerd door alle bestuurders in het snelwegennetwerk. De totale tijd gespendeerd door alle bestuurders

in het snelwegennetwerk kan worden berekend op basis van de verkeersdichtheid (toestandgrootheid) in de snelwegen gecombineerd met de snelwegdimensies.

Verscheidene kostfunkties of performantiematen kunnen worden gedefinieerd:

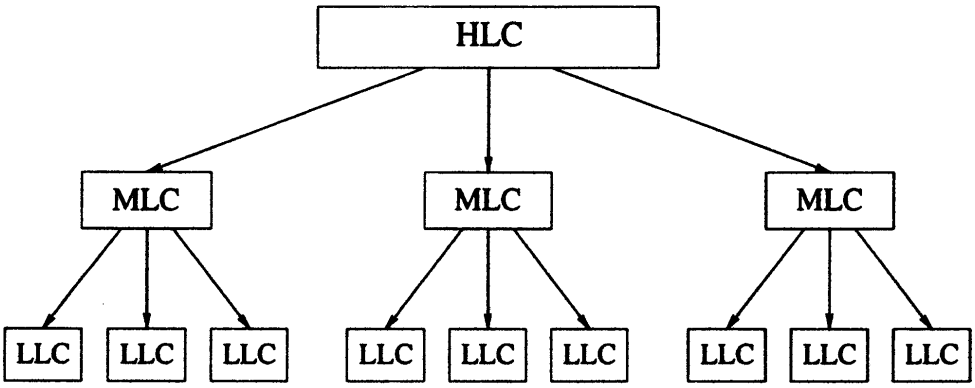
- Vermijden of verminderen van het optreden van files
- Verminderen van de lengte en de duur van files
- Minimalisatie van de 'worst-case' reistijden. Hierbij kunnen alle weggebruikers in dezelfde mate in rekening gebracht worden maar het is ook mogelijk om bepaalde weggebruikers sterker in rekening te brengen dan andere (bvb. Vrachtvervoerders, openbaar vervoer, …)
- Verhoging van de verkeersintensiteit (d.i. het aantal voertuigen dat een bepaald punt op de snelweg passeert in een bepaald tijdsinterval) op de snelweg.

Naast deze zuiver verkeerstechnische kost kan ook een duurzaamheidsaspect in rekening worden gebracht in de kostfunktie. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om economische of milieukost in de kostfunktie in te brengen.

6.3.2 Modelgebaseerde regeling in DVM systemen voor snelwegennetwerken

Indien we de algemene methodiek van modelgebaseerde controle vertalen naar de verkeerscontext levert dit volgende aanpak op. Er dient een kostfunktie gedefinieerd te worden dewelke aangeeft of de heersende verkeerstoestand al dan niet performant is. Vervolgens trachten we de kostfunktie te minimaliseren rekening houdend met het gedrag van het systeem/snelwegennetwerk beschreven in het model. In wat volgt bespreken we hoe dit praktisch in zijn werk gaat.

In een snelwegennetwerk kan de invloed van bepaalde gebeurtenissen zich voortplanten doorheen het netwerk en de invloed van andere, toekomstige toestanden van het netwerk beï nvloeden. Gelukkig is meestal een voldoend aantal buffers aanwezig in dit systeem zodat de effecten van gebeurtenissen in een bepaald deel van het netwerk enkel een invloed hebben op de naburige delen van het netwerk en uitsterven in plaats van zich voort te planten naar verder gelegen gebieden in het netwerk. Dit impliceert dat we bepaalde gebieden in het netwerk kunnen ontkoppelen. Daarnaast is het opstellen van een model dat alle flows en toestanden in het gehele netwerk accuraat beschrijft een enorme taak. Soms kan door de ontkoppeling van bepaalde gebieden in het netwerk het opstellen van een dergelijk gigantisch model vermeden worden. Indien we een model van een geheel snelwegennetwerk ter beschikking hebben, maakt de omvang en de complexiteit ervan het zeer moeilijk om het te analyseren of binnen een redelijk tijdsbestek te simuleren. Het 'real-time' en 'on-line' bepalen van optimale controle strategieën op basis van een dergelijk reuze-model stelt problemen. Daarom wordt het zoeken naar een optimale regelstrategie vaak op een *hiërarchische* wijze aangepakt. In een hiërarchisch kader gaan hoog niveau regelaars algemene controlesignalen leveren die expliciet worden gemaakt door de regelaars op laag niveau (figuur 6.3). De regelaars op hoog niveau spitsen zich doorgaans toe op trager variërende algemenere eigenschappen van het systeem. De regelaars op lager niveau brengen minder informatie in rekening bij het nemen van beslissingen maar nemen beslissingen aan een hogere frekwentie.



Figuur 6.3 : Een illustratie van het concept hiërarchische controle. De hoog niveau regelaar (HLC) coördineert het gedrag van de regelaars op het middenste niveau (MLC) die op hun beurt elk het gedrag coördineren van de laag niveau regelaars (LLC).

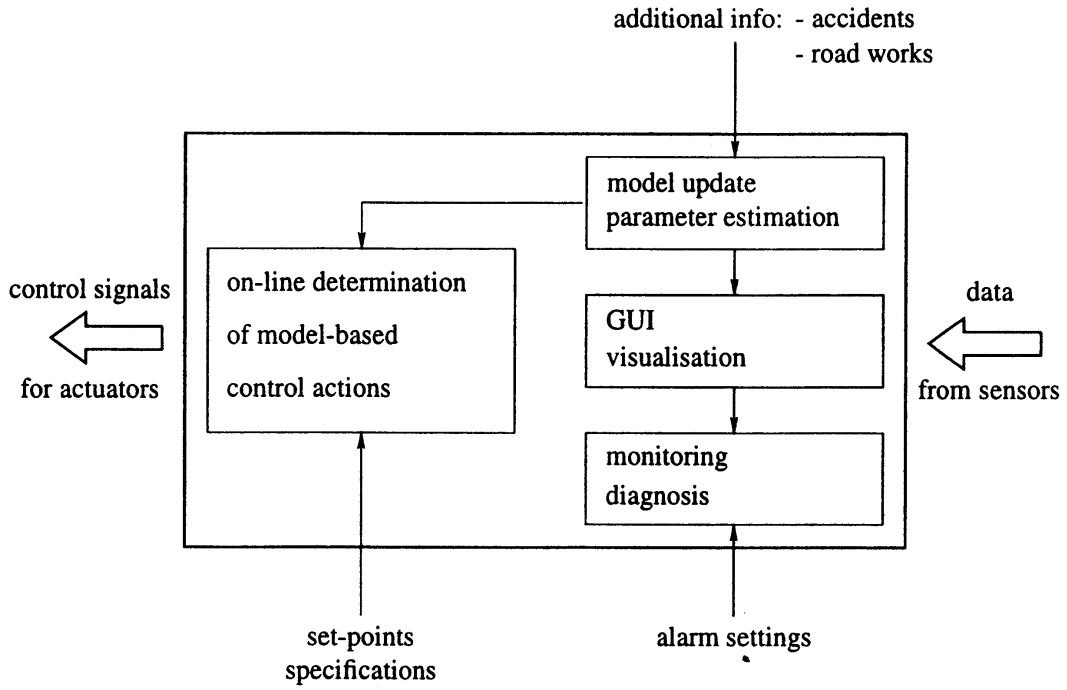
Een maximale hoeveelheid van de regeling wordt overgelaten aan de lokale (laag niveau) regelaars (die bijvoorbeeld een gedetailleerde regeling van een enkele toeritdosering implementeren). Echter, de lokale regelacties worden niet onafhankelijk gegenereerd van de effecten die de implementatie van deze acties zal hebben op andere delen van het snelwegennetwerk: bijvoorbeeld, een lokaal optimale regeling van een toeritdoseringsopstelling op een ring rond een stad zal niet noodzakelijk bijdragen tot een optimalere toestand indien we kijken naar het hele netwerk. Onder bepaalde omstandigheden kunnen lokaal optimale regelacties elkaar opheffen of in het slechtste geval elkaar zelfs tegenwerken. Daarom worden de regelacties van de verschillende lokale regelaars gecoördineerd en gesuperviseerd door een hoger niveau regelaar. De globale, hoog niveau regelaar regelt de samenwerking van de verschillende lokale regelaars en genereert algemenere acties. Het is mogelijk om de hoog niveau regelaars op hun beurt nogmaals te laten superviseren door een regelaar op een nog hoger niveau.

Zelfs indien we een hiërarchische benadering gebruiken om een werkbare modelstructuur te realiseren kan de rekencomplexiteit van het regelprobleem nog te groot zijn. Daarom worden ook heuristische methoden gebruikt in DVM systemen. Daarenboven kan de enorme praktische expertise aanwezig bij verkeersoperatoren getransfereerd worden naar een artificieel intelligent systeem of een fuzzy-inferentie-systeem dat kan gebruikt worden om de operatoren bij te staan bij het nemen van beslissingen.

Aangezien we voor DVM systemen een on-line en real-time regeling willen realiseren is de afweging tussen ‘optimaliteit’ (hoe kort is de gevonden oplossing verwijderd van het globale optimum?) van de oplossing en de vereiste rekenkracht om die oplossing te vinden zeer belangrijk. Een andere keuze die gemaakt moet worden, is de keuze tussen statische en dynamische algoritmen. Wanneer we bijvoorbeeld statisch geoptimaliseerde regeling van toeritdoseringsopstellingen toepassen, dan worden de optimale regelsignalen berekend op basis van de huidige en de voorspelde verkeerssituaties. Bij een dynamisch geoptimaliseerde regeling van een

toeritdoseringsopstelling zullen nieuwe regelacties worden berekend telkens bijkomende gegevens beschikbaar zijn. Hoewel de dynamische algoritmen een hogere nauwkeurigheid kunnen behalen, is het duidelijk dat de vereiste rekenkracht veel groter is dan voor de statische algoritmen.

Dit alles leidt uiteindelijk tot een verkeersregelopstelling met een globale structuur zoals in figuur 6.2. De typische structuur van een DVM systeem is weergegeven in figuur 6.4. De inputgegevens van het DVM systeem komen van de sensoren langsheen de snelwegen. Bijkomende informatie zoals ongevallen, wegwerkzaamheden, … kunnen worden ingevoerd door de wegpolitie. Al deze informatie wordt gebruikt om het model van de verkeersstromen in het snelwegennetwerk bij te sturen. Dit bijgestuurde model wordt vervolgens gebruikt om de optimale regelacties te bepalen. De regelacties worden beï nvloed door externe factoren (set-points) (bvb. weersomstandigheden, …) en specificaties (bvb. maximaliseer de globale doorstroming, minimaliseer globale reistijd voor openbaar vervoer, …).



Figuur 6.4 : Schema van een DVM systeem. Er wordt gebruik gemaakt van model gebaseerde analyse, simulatie en optimisatie algoritmen om zo optimaal mogelijke regelacties te vinden.

6.4 Stand van zaken en toekomstperspectief

In deze paragraaf vatten we kort de huidige stand van zaken wat betreft de architectuur voor verkeersregeling samen en kijken we even naar de toekomst.

- In het kader van het huidige klassieke verkeersmanagement wordt gestreefd naar een betere benutting van de bestaande capaciteit door gebruik te maken van

afzonderlijke maatregelen. Deze maatregelen worden elk afzonderlijk geoptimaliseerd zonder dat gekeken wordt naar mogelijke beï nvloeding van de verschillende maatregelen.

- In de toekomst kan nog een performantieverbetering gerealiseerd worden door de verschillende maatregelen op globale schaal te optimaliseren. Er kunnen meerdere gelijkaardige opstellingen worden ingeschakeld om een betere benutting van de huidige capaciteit te bewerkstelligen: **gecoördineerde regeling**. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van toeritdosering op verschillende opeenvolgende opritten om het verkeer op een snelweg vlot te houden en ondertussen toch het totale aantal wachtenden over de verschillende opritten minimaal te houden. Het is duidelijk dat in deze toepassing de verschillende opstellingen elkaar kunnen beï nvloeden. Gecoördineerde controle dient ervoor te zorgen dat dit een positieve beï nvloeding is. Het is ook mogelijk om verschillende DVM systemen in te schakelen en globaal te optimaliseren: **geïntegreerde controle**. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om toeritdosering te combineren met snelheidsharmonisatie om te komen tot een optimale verkeersafwikkeling.
- Tot slot vermelden we ook een mogelijke aanpak in de iets verdere toekomst waar gebruik kan gemaakt worden van intelligente voertuigen en een intelligente infrastructuur. De idee hierachter is dat op langere termijn een deel van de verantwoordelijkheden van de bestuurder zal overgenomen worden door een geautomatiseerd systeem in de wagen, bijvoorbeeld voor de harmonisatie van snelheden.

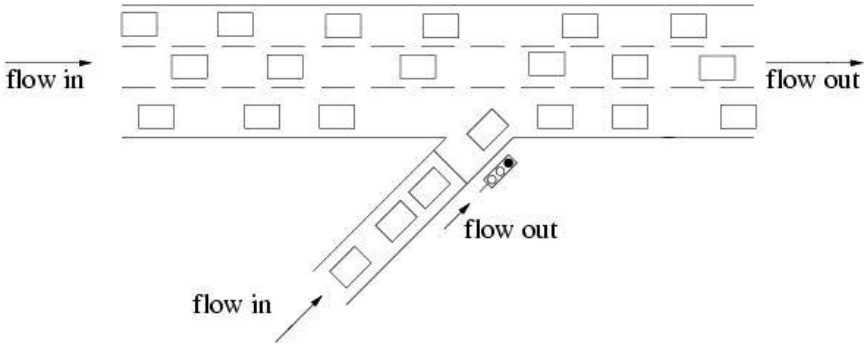
6.5 Een praktisch voorbeeld: toeritdosering

In dit laatste deel over verkeersregeling geven we een voorbeeld van DVM strategie voor een snelweg: toeritdosering. We beginnen met een beschrijving van toeritdoseringsopstelling en vervolgens bespreken we de kostfunktie die volgt uit het beleid en praktische overwegingen. Daarna illustreren we dat we een optimalisatieprobleem met beperkingen bekomen en tot slot geven we de resultaten van een simulatie.

6.5.1 Beschrijving van de opstelling

Toeritdosering is een DVM maatregel die bestaat uit het druppelsgewijze toelaten van voertuigen tot de snelweg. Elke snelweg heeft een kritische verkeersdichtheid waarboven de verkeersstroom afneemt met toenemende verkeersdichtheid. De idee achter toeritdosering bestaat eruit de doorstroming van voertuigen doorheen de snelweg zo optimaal mogelijk te houden door de verkeersdichtheid steeds kleiner te houden dan de de kritische dichtheid. In de praktijk kan dit gerealiseerd worden door het plaatsen van een verkeerslicht aan de oprit van een snelweg om zo het aantal wagens dat de snelweg kan oprijden te beperken. De regelparameter die toelaat de toestand van de verkeersafwikkeling op de snelweg te beï nvloeden is het aantal wagens dat tot de snelweg toegelaten wordt of de duur van de groene fase van het verkeerslicht.

In figuur 6.5 zien we een schematische voorstelling van een snelweg met een oprit. Aan de oprit is een verkeerslicht geplaatst en er is ruimte voorzien om een wachtrij aan het verkeerslicht op te vangen.



Figuur 6.5 : Schematische voorstelling van een toeritdoseringsopstelling: twee opeenvolgende snelwegsecties en een oprit met een verkeerslicht en een wachtrij.

Een praktisch voordeel van toeritdosering is dat het makkelijk kan afgedwongen worden. De automobilisten moeten stoppen voor het rode licht om geen zware verkeersovertreding te begaan. Bijgevolg gaan we er van uit dat er geen wagens op de snelweg zullen rijden indien het verkeerssignaal rood is. Daarnaast is het aantal wagens dat de snelweg oprijdt ook eenvoudig te kwantiseren: door de groene fase zeer kort te maken kan wagen per wagen gedoseerd worden. (In dit voorbeeld maakten we echter de vereenvoudiging dat het aantal wagens geen natuurlijk getal diende te zijn)

6.5.2 Kostfunktie

Een verkeersbeleid van de overheid zou eruit kunnen bestaan om de doorstroming op de snelwegen maximaal te houden. Er kan aangetoond worden dat dit kan gerealiseerd worden door de totaal gespendeerde tijd van alle wagens in het snelwegennetwerk in een tijdsinterval te minimaliseren. De totaal gespendeerde tijd in het snelwegennetwerk over een tijdsinterval zou dus als kostfunktie vooropgesteld kunnen worden:

$$J = \sum_{k=0}^{T} [C_1^{13}(k) l_1 n_1 + C_2^{13}(k) l_2 n_2 + C_2^{43}(k) l_2 n_2] \Delta t \, .$$

Hierbij is [0,T].Ät het interval waarover de totaal gespendeerde tijd geminimaliseerd wordt, C_i^{jk} de verkeersdichtheid van de voertuigen rijdend van oorsprong j naar bestemming k in snelwegsectie i, l de lengte van de snelwegsectie en n het aantal rijstroken van de snelweg. Δt is de tijdsstap.

Er is echter een praktische beperking in ons geval van toeritdosering: veronderstel dat het extreem druk is op onze snelweg en dat de kritische dichtheid reeds bereikt is. In dit geval betekent elke wagen die de wachtrij op de oprit verlaat een verhoging van de dichtheid op de snelweg en bijgevolg een daling van de doorstroming van de snelweg. Bijgevolg zal met de vooropgestelde kostfunktie een optimale regeling gevonden worden die eruit bestaat om het licht steeds op rood te laten staan en geen wagens meer toe te laten. Dit is natuurlijk onaanvaardbaar. We kunnen niet toelaten dat wagens moeten wachten tot de spits voorbij is om van de snelweg gebruik te kunnen maken. Daarom vullen we de voorgestelde kostfunktie aan met een term die de tijd

van de voertuigen in de wachtrij ook in rekening brengt, resulterend in volgende kostfunktie:

$$J = \sum_{k=0}^{T} [C_1^{13}(k) l_1 n_1 + C_2^{13}(k) l_2 n_2 + C_2^{43}(k) l_2 n_2 + q^{43}(k)] \Delta t \,.$$

Hierin is $q^{43}(k)$ de lengte van de wachtrij op tijdstip k. Een optimale regeling zal eruit bestaan een afweging te maken tussen het verkorten van de wachtrij aan het verkeerslicht en een verlies van doorstroming op de snelweg.

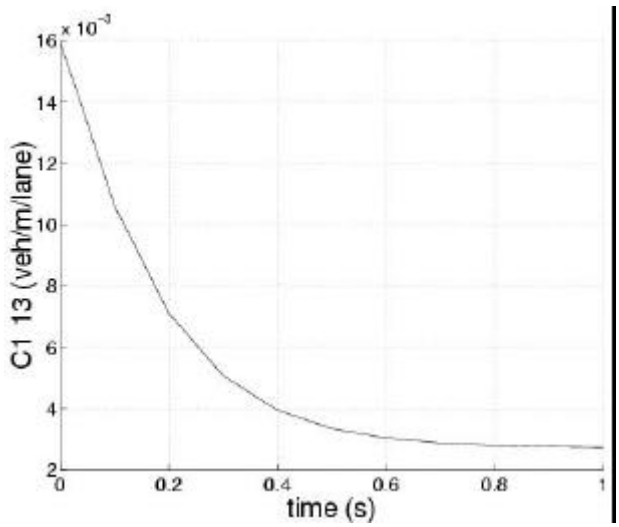
6.5.3 Optimalisatieprobleem met beperkingen

Nu rest ons nog de optimale waarde van het aantal wagens toegelaten tot de snelweg te bepalen. Dit komt neer op het minimaliseren van bovenstaande kostfunktie rekening houdend met een aantal beperkingen. Vooreerst dient rekening gehouden te worden met het verkeersmodel dat de relatie tussen inputs (stromen voertuigen) en de toestanden (verkeersdichtheid, gemiddelde snelheid, …) beschrijft. In dit voorbeeld maakten we gebruik van het macroscopisch verkeersmodel van Lighthill, Whitham en Richards. Daarnaast zijn er ook nog een aantal bijkomende beperkingen die volgen uit de aard van het probleem: de verkeerdichtheden op de snelweg dienen positief te zijn en zijn bovendien ook naar boven begrensd: $0 \le C \le C_{jam}$ (het maximale aantal wagens op een snelweg is begrensd, al is het maar door hun fysische afmetingen). Verder geldt voor de lengte van de wachtrij dat deze positief is en kleiner dan een bepaalde waarde $q_{\max}$ omdat het onderliggend wegennet aan de oprit niet mag overbelast worden. Dit resulteert in volgende bijkomende beperkingen: $0 \le q \le q_{\max}$.

6.5.4 Experiment

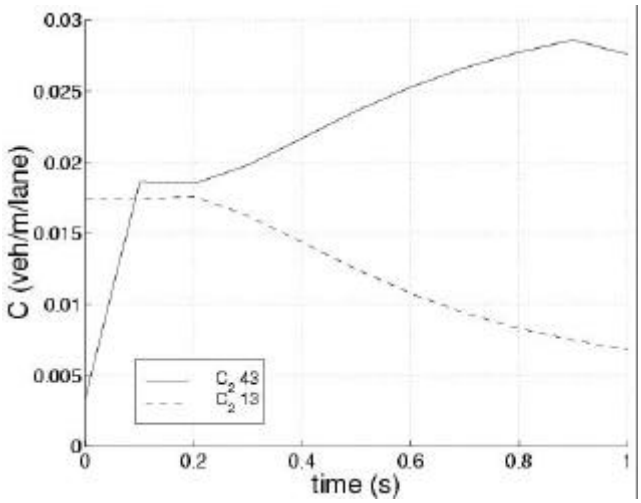
Tot slot vermelden we de resultaten van een eenvoudig experiment dat werd opgezet. Er wordt verondersteld dat de voertuigstromen die het netwerk uit figuur 6.5 instromen gekend zijn en dat het verkeer dat het netwerk wil verlaten er ongehinderd uit kan. Oorspronkelijk is een wachtrij aanwezig en op tijdstip 0 is er bovendien een daling in de verkeersflow op de snelweg.

Na optimalisatie van het toeritdoseringsdebiet vinden we het volgende verloop van de dichtheden op de snelwegsecties. In figuur 6.6 zien we dat de verkeersdichtheid in de snelwegsectie voor de oprit daalt aangezien ook de instroom in die sectie plots daalde op tijdstip 0.



Figuur 6.6 : Verloop van de verkeersdichtheid in de tijd in de snelwegsectie stroomopwaarts van de oprit.

In figuur 6.7 tekenen we het verloop van de verkeersdichtheid in de sectie na de toerit. We maken een onderscheid tussen de voertuigdichtheid veroorzaakt door de wagens komende van de eerste snelwegsectie (streeplijn) en de wagens afkomstig van de wachtrij (volle lijn). De volledige verkeersdichtheid in de sectie na de toerit is de som van beide verkeersdichtheden.



Figuur 6.7 : Verloop van de verkeersdichtheid in de tijd in de snelwegsectie stroomafwaarts van de oprit. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de dichtheid afkomstig van de wagens komende uit de eerste sectie (streeplijn) en de wagens afkomstig van de wachtrij (volle lijn). De totale verkeersdichtheid in de tweede snelwegsectie is de som van beide dichtheden.

We zien dat de optimale regelstrategie erin bestaat om toch minimaal wagens toe te laten tot de snelweg. Gaandeweg daalt de verkeersdichtheid van de wagens komende van de vorige snelwegsectie (streeplijn) wegens de gedaalde instroom in de eerste sectie. Bijgevolg kan de wachtrij sneller opgelost worden door het doseertempo op te voeren, resulterend in een grotere verkeersdichtheid van wagens afkomstig van de wachtrij.

6.6 Besluit

Het opstellen van een modelgebaseerd dynamisch verkeersmanagement (DVM) systeem start bij de definitie van een beleid. Dit beleid wordt vertaald in een kostfunktie. Een model van het gedrag van de verkeersstromen wordt gebruikt in combinatie met een optimalisatiealgoritme om te bepalen hoe optimaal op veranderende verkeerssituaties moet gereageerd worden zodat de kostfunktie minimaal is.

Het gebruikte verkeersmodel in de DVM systemen wordt gevoed en met metingen van verkeersparameters afkomstig van de sensoren. De optimalisatiestap is een zeer rekenintensieve stap zodat belang dient gehecht te worden aan het maximaal reduceren van de rekencomplexiteit. Dit kan onder andere gerealiseerd worden door de keuze van macroscopische modellen, door het definiëren van ontkoppelde gebieden in het netwerk en door hiërarchische controle toe te passen.

Gecoördineerde en geï ntegreerde controle is nodig indien meerdere, al dan niet verschillende, DVM systemen gecombineerd worden. Er wordt gezocht naar een globaal optimum zodat de verschillende DVM systemen elkaar niet tegenwerken en elkaars werking zelfs versterken.

Ter afsluiting van dit hoofdstuk werd toeritdosering in meer detail bestudeerd.

7. Algemeen besluit

Files worden een steeds belangrijker probleem voor onze huidige samenleving. Het vastlopen van het verkeer, met bijhorend gebrek aan mobiliteit, heeft een rechtstreekse invloed op onze levenskwaliteit. Files hebben een zeer negatieve impact op het milieu (luchtvervuiling, lawaaioverlast, …), op onze gezondheid (stress, …), op de economie, … Oplossingen die snel en bij voorkeur goedkoop kunnen worden geï mplementeerd dringen zich op.

In dit project werd modelgebaseerd regelen van dynamisch verkeersmanagement systemen onder de loupe genomen. Hierbij ligt de klemtoon op het streven naar een optimale benutting van de bestaande verkeerscapaciteit van het snelwegennet.

Bij de studie van modelgebaseerde regeling van dynamisch verkeersmanagement systemen komen volgende aandachtspunten aan het licht :

- De keuze van een gepast verkeersmodel is zeer belangrijk. Microscopische modellen zijn in staat om een file gedetailleerd te beschrijven. Macroscopische modellen zijn minder nauwkeurig maar bewijzen hun nut in tijdskritieke toepassingen wegens de beperktere rekencomplexiteit. Wat de modelkeuze betreft concluderen we dat: ‘De modelkeuze is sterk afhankelijk van de toepassing’.
- Voor de kalibratie en validatie van de modellen worden verkeersgegevens gebruikt. Voor een goede validatie van een verkeersmodel is inzicht in de bestaande verkeerssituatie en een grondige verkeerskundige analyse onontbeerlijk.
- De keuze van de te implementeren dynamisch verkeersmanagement systemen (mogelijk met het oog op integratie of coördinatie van deze systemen) vergt kennis van de alternatieven die praktisch realiseerbaar zijn. Deze kennis werd in dit project gebundeld in een inventarisatie van de dynamisch verkeersmanagement systemen.
- Optimale regeling vergt een definitie van ‘optimaliteit’. Het is bij deze definitie dat het duurzaamheidsaspect aan bod komt. De definitie van wat een optimale verkeersafwikkeling is, wordt vertaald naar een kostfunktie. Vervolgens worden met behulp van het verkeersmodel en een optimalisatiealgoritme de regelacties bepaald die de kost zo klein mogelijk maken. Om de rekencomplexiteit beheersbaar te houden kunnen technieken als hiërarchische regeling ingevoerd worden.

Als belangrijk besluit van dit project kunnen we stellen dat in vele praktische situaties in België een significant efficiëntere verkeersafwikkeling realiseerbaar is door gebruik te maken van modelgebaseerde regeling van dynamisch verkeersmanagement systemen. De invoering van deze systemen dient echter steeds gepaard te gaan met een grondige studie.

Tot slot wensen we er nog even de aandacht op te vestigen dat de verdere ontwikkeling en verfijning van dynamische verkeersmodellen en de studie van duurzame kostfunkties onderwerpen zijn die in de toekomst zeker bijkomend onderzoek verdienen.

Appendix A : Adviesgids software

De keuze van een dynamisch verkeersmodel hangt hoofdzakelijk af van de doelstellingen van het project waartoe het aangeschaft wordt. Hierdoor is het zinloos een uitspraak te doen over ‘het beste’ commerciële pakket.

Volgende aspecten spelen vaak een rol bij het uit kiezen van een pakket :

- Grootte te modelleren netwerk
- Gewenste nauwkeurigheid
- Analytische duidelijkheid versus voldoende complexiteit
- Gebruiksvriendelijkheid versus openheid voor eigen inbreng van extra modules
- Te implementeren DVM maatregelen
- De kwaliteit van de grafische output zodat niet-ingewijden een beeld kunnen vormen van de gesimuleerde verkeerssituatie.
- Beschikbare uitvoer : overzichtsparameters, detailgegevens, ...
- Kalibratie en Validatie mogelijkheden

Een overzicht van enkele belangrijke pakketten wordt hierbij toegevoegd, waarbij vooral de doelstellingen van het project als selectiecriteria werden genomen.

A.1 Overzicht commerciële microscopische modellen

Bij het opstellen van dit overzicht werd een beroep gedaan op the Smartest Study. Deze Europese studie, uit 1997, had ondermeer als doel de kloof tussen de ontwerpers en gebruikers van microsimulatiepakketten te ontleden. Als onderdeel hiervan werd een overzicht opgesteld van 32 microsimulatiepakketten.

Hiervan zijn de meeste modellen nog in ontwikkelingsfase en hebben ze eerder beperkte mogelijkheden. Soms zijn geen maatregelen implementeerbaar, is de grootte van het studiegebied beperkt of is het mogelijk aantal voertuigen klein. Slechts negen van de tweeëndertig pakketten zijn een commercieel produkt.

Hieruit werden vijf pakketten geselecteerd die grondig met elkaar vergeleken werden. Hieronder wordt het uittreksel van de Smartest study weergegeven :

- **List of models**

The 5 analysed models are listed in Table 1.

Model	Organisation	Country
AIMSUN 2	Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona	Spain
CORSIM	Federal Highway Administration	USA
INTEGRATION	Queen's University, Transportation Research Group	Canada
PARAMICS	The Edinburgh Parallel Computing Centre and Quadstone Ltd	UK
VISSIM	PTV System Software and Consulting GMBH	Germany

Table 1: List of analysed micro-simulation models.

CORSIM is a combination of two other micro-simulation models: the urban micro-simulator TRAF-NETSIM and the freeway micro-simulator FRESIM.

- **Comparative charts**

a) Transport telematics functions

Numbers in Table 2 refer to the following transport telematics functions :

1	Co-ordinated traffic signals	11	Dynamic route guidance
2	Adaptive traffic signals	12	Parking guidance
3	Priority to public transport vehicles	13	Public transport information
4	Ramp metering	14	Automatic debiting and toll plazas
5	Motorway flow control	15	Congestion pricing
6	Incident management	16	Adaptive cruise control
7	Zone access control	17	Automated highway system
8	Variable message signs	18	Autonomous vehicles
9	Regional traffic information	19	Support for pedestrians and cyclists
10	Static route guidance	20	Probe vehicles
		21	Vehicle detectors

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
AIMSUN 2	X	X		X		X	X	X		X	X			X							X
CORSIM	X	X	X	X	X	X															
INTEGRATION	X	X	X	X	X	X		X		X	X		X	X	X					X	X
PARAMICS	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X			X	X		X			X	X
VISSIM	X	X	X	X	X								X						X	X	X

Table 2: Transport Telematics functions studied.

Other functions provided :

VISSIM Automatic cruise control
Congestion warning for individual vehicles

b) Objects and phenomena

Numbers in the comparative Table 3 below refer to the following objects and phenomena:

1	Weather conditions	8	Incidents
2	Search for a parking space	9	Public transports
3	Parked vehicles	10	Traffic calming measures
4	Elaborate engine model	11	Queue spill back
5	Commercial vehicles	12	Weaving
6	Bicycles / motorbikes	13	Roundabouts
7	Pedestrians		

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AIMSUN 2								X	X		X	X	X
CORSIM		X	X		X		X	X	X		X	X	X
INTEGRATION					X			X	X	X	X	X	X
PARAMICS	X	X			X			X	X	X	X	X	X
VISSIM			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X

Table 3: Objects and phenomena modelled.

Other objects and phenomena modelled:

PARAMICS Barred turns
High Occupancy Vehicle lanes
Signal Stacking Space
Turning lanes
Stay-in lanes
Road curvature
Gradient
Headway in tunnels, etc.

c) Indicators

Symbols in the comparative table below refer to the following indicators:

Objective	Indicator	Objective	Indicator
Efficiency:	E1: modal split	Safety	S1: headway
	E2: travel time		S2: overtaking
	E3: travel time variability		S3: time-to-collision
	E4: speed		S4: number of accidents
	E5: congestion		S5: accident speed/severity
	E6: public transport regularity		S6: interaction with pedestrians
	E7: queue length	Comfort	F1: physical comfort
Environment	V1: exhaust emissions		F2: stress
	V2: roadside pollution level	Technical performance	T1: fuel consumption
	V3: noise level		T2: vehicle operating costs

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	V1	V2	V3	F1	F2	T1	T2
AIMSUN 2	X	X		X			X							X					X	
CORSIM		X	X	X	X		X		X					X					X	
INTEGRATION		X	X	X	X									X					X	
PARAMICS		X	X	X	X	X	X	X	X					X		X			X	
VISSIM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X					X	

Table 4: Indicators provided.

Other indicators provided:

INTEGRATION	Efficiency	number of stops
VISSIM	Efficiency	transit delay due to signals
		passenger delay

d) Other model properties

Numbers in the comparative chart below refer to the following model properties:

1	Sensible default values for key parameters are provided
2	Key parameters can be user-defined
3	Limited need for data acquisition
4	Easy integration with other models
5	Easy integration with other databases and Geographic Information System
6	Approved by local / national transportation body
7	Will run on a low cost non-specialist hardware, e.g. a PC rather than a UNIX box
8	Quantify the typical execution speed (symbols used are F for faster, S for slower and a number to quantify the speed e.g. F 1-3 means from 1 to 3 times faster than real-time)
9	Graphical Network Builder
10	Graphical Animation of Results

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AIMSUN2	X	X		X	X		PC, UNIX		X	X
CORSIM	X	X	X	X		FHWA	PC			X
INTEGRATION	X	X	X				PC, UNIX, VAX	F 1-5		X
PARAMICS	X	X		X			UNIX	F 2	X	X
VISSIM	X	X	X		X	GMT	PC, UNIX	real-time	X	X

Table 5: Other model properties.

Abbreviations used:
FHWA: Federal Highway Administration (USA)
GMT: German Ministry of Transport

- **Selectie van twee pakketten in het project**

Uitgaande van de vergelijkende tabellen, die met demoversies en andere documentatie werden aangevuld, werd besloten de pakketten Paramics en Aimsun2 aan te schaffen in het kader van dit project.

Appendix B : Overzicht publicaties.

- Li B., De Moor B., ``Dynamic total least squares estimation of intersection origin-destination matrices", in Proc. of the European Control Conference (ECC'99), Aug.-Sep. 1999, F245 p.
- B. De Schutter and B. De Moor, ``Optimal traffic light control for a single intersection," European Journal of Control, vol. 4, no. 3, 1998, pp. 260-276.
- Li B. and De Moor B., ``Recursive optimization for intersection equality-constrained optimization for intersection origin-destination matrices", Transporation Research, vol. 33B, no. 3, Apr.1999, pp. 203-214.
- De Schutter B., Bellemans T., Logghe S., Stada J., De Moor B., Immers B., “Advanced traffic control on highways”, Journal A, 99/4, p. 42-51. december 1999
- Bellemans T., De Schutter B., De Moor B., “Models for traffic control”, Intern rapport 01-89 , ESAT/SISTA, K.U. Leuven. Aanvaard voor publicatie in Journal A.
- de Vries R.E., De Schutter B., De Moor B., ``On max-algebraic models for transportation networks", Proceedings of the International Workshop on Discrete Event Systems (WODES’98), Cagliari, Italy, pp 457-462, August 26-28 1998.
- B. De Schutter and B. De Moor, ``Optimal traffic light control for a single intersection," Proceedings of the 1997 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'97), Honolulu, Hawaii, pp. 1085-1088, Nov. 29-Dec. 3, 1997.
- Li B., ``Robust recursive identification of intersection origin-destination matrices", Internal Report 98-51, ESAT-SISTA, K.U.Leuven (Leuven, Belgium), 1998. IFAC Workshop on Adaptive control and signal processing.
- De Cock K., De Moor B., ``Stochastic System Identification for ATM Network Traffic Models: a Time Domain Approach", in Proc. of the Mathematical Theory of Networks and Systems 98 Symposium (MTNS-98), Padova, Italy, Jul. 1998, pp. 739-742.
- Bellemans T., De Schutter B., De Moor B., “On data acquisition, modeling and simulation of highway traffic”, Presentation on 13 June 2000, Proceedings of the 9th IFAC Symposium on Control in Transportation systems 2000, pp. 22-27, 13-15 juni, Braunschweig, Duitsland.
- Bellemans T., De Schutter B., De Moor B., “An improved first order macroscopic flow highway traffic simulation”, Proceedings of 2001 American Control Conference (CDROM).
- Logghe S., Immers L.H., “Representation of traffic shock waves in micro-simulation models.”, 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, November 2000, Turin
- Logghe S., and Immers L.H., Micro-simulation of congested traffic flows, Proceedings of the Seminar on ‘Advances and Applications in Dynamic Traffic Flow Modeling’, Delft 2 februari, 2001
- Immers L.H., De Ceuster G., Logghe S. and Stada J.E., Time-of-day modeling using a quasi-dynamic equilibrium assignment approach, Triennial Symposium on Transportation Analysis TRISTAN IV, June 13-19 2001, Sao Miguel, Azores, Portugal

- Immers L.H., De Moor B. “Voorstel aanpak Duurzame Mobiliteit project fileproblematiek op het Belgische wegennet”, Interne nota , Groep verkeer en vervoerskunde – SISTA, K.U.Leuven, 1998
- Bellemans T., De Schutter B., De Moor B., “Optimal ramp metering on highways”, Presentation 4 March 1999, “18th Benelux meeting on Systems and Control”, Book of abstracts 18th Benelux meeting on Systems and Control, p. 97, March 1999.
- Bellemans T., De Schutter B., De Moor B., “Data acquisition, interfacing and pre-processing of highway traffic data”, Book of abstracts Telematics Automotive 2000, 11-13 April, Birmingham, Engeland.
- Bellemans T., De Schutter B., De Moor B., “Fitting of a flow model to sensor data of highway traffic”, Book of abstracts 19e Benelux meeting on Systems and Control, pp. 31, 1-3 Maart, Mierlo, Nederland.
- Logghe S., Bellemans T., Immers B. , De Moor B., “Het fileprobleem in België: wiskundige modellen, analyse, simulatie, regeling en actie. Studiedag van 30 september 1999 : “Op weg” naar een duurzame mobiliteit: Van de probleemstelling naar de formulering van oplossingen, september 1999.
- Logghe S., en Immers L.H., Evaluatie effecten DVM-maatregelen met behulp van microsimulatie, 4de DVM symposium, Rotterdam, 25 april 2001.

Appendix C : Administratieve gegevens.

C.1 Data gebruikersgroepvergaderingen

- Gebruikersgroepvergadering 1: 21 januari 1999
- Gebruikersgroepvergadering 2: 24 juni 1999
- Gebruikersgroepvergadering 3: 17 maart 2000
- Gebruikersgroepvergadering 4: 20 oktober 2000
- Gebruikersgroepvergadering 5: 22 juni 2001

C.2 Overzicht rapporten

- Aanvangsverslag
- Bij elke gebruikersgroepvergadering hoort een rapport handelend over de op de gebruikersgroepvergadering gepresenteerde inhoud.
- Syntheserapport DWTC: 18/09/2000
- Eindverslag