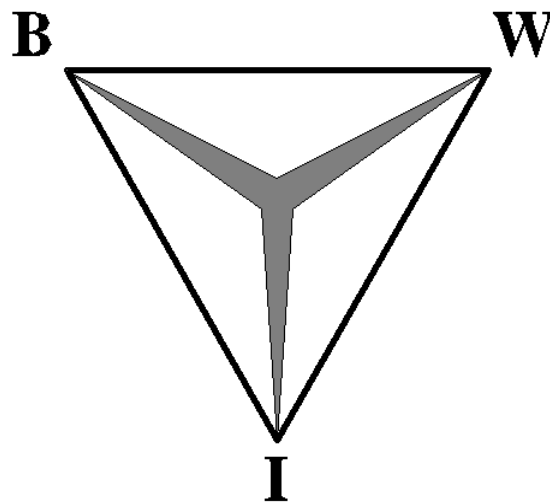


Modelleren van het verkeer in twee en drie fasen

Mette Nolte
juni 2006



Vrije Universiteit Amsterdam
Faculteit der Exacte Wetenschappen
Studierichting Bedrijfswiskunde en Informatica
De Boelelaan 1081a
1081 HV Amsterdam

Voorwoord

Tot de studie Bedrijfswiskunde en Informatie behoort als één van de laatste onderdelen het schrijven van een BWI-werkstuk.

Rob van der Mei had een voorstel voor dit BWI-werkstuk met betrekking tot de filevorming. Dit onderwerp leek mij erg interessant om dieper op in te gaan, daar ook mij het stilstaan in de file erg irriteert.

Graag wil ik Rob van der Mei bedanken voor het begeleiden van dit BWI-werkstuk en ook wil ik Sandjai Bhulai bedanken voor de tijd die hij heeft vrijgemaakt om ook mee te denken over dit onderwerp.

Mette Nolte,
juni 2006

Samenvatting

In de afgelopen jaren is het aantal voertuigen dat zich voortbeweegt over de Nederlandse wegen ernstig toegenomen, waardoor ook het aantal files enorm gestegen is.

Om inzicht te kunnen krijgen in de oorzaak van de filevorming en tevens voor het vinden van passende oplossingen voor dit probleem, zijn er verscheidene modellen ontwikkeld.

Deze modellen werden in de jaren '50 tot en met '90 gekarakteriseerd door het verkeer te modelleren in twee fasen. Vanaf de jaren '90 zijn er echter ook modellen ontwikkeld waarbij het verkeer in drie fasen wordt gemodelleerd.

Dit BWI-werkstuk bespreekt zowel het modelleren van het verkeer in twee fasen als in drie fasen en vergelijkt deze twee mogelijkheden in eerste instantie op basis van de beschikbare literatuur. Een simulatieprogramma zal vervolgens ingezet worden om beide aanpakken te simuleren om ook op basis van een dergelijk programma de vergelijking te kunnen maken tussen het modelleren in twee fasen en het modelleren in drie fasen.

Door middel van de vergelijking, op basis van de literatuur en de resultaten van het simulatieprogramma, van het modelleren van het verkeer in twee fasen en het modelleren in drie fasen blijken beide methoden bruikbaar te zijn. Dat wil zeggen dat beiden mogelijkheden ingezet zouden kunnen worden door modellen om zo een oplossing te vinden voor de filevorming. Echter geeft het modelleren van het verkeer in drie fasen een gedetailleerder beeld weer dan het modelleren van het verkeer in twee fasen waarbij alleen gemiddelde resultaten worden weergegeven. Voor het gedetailleerde beeld van het modelleren in drie fasen is wel uitgebreider rekenwerk vereist.

Inhoud

2. Modelleren van het verkeer in twee fasen.....	11
2.1 Variabelen	11
2.2 Begrippen	13
2.3 Fundamenteel diagram	14
2.3.1 Het ontstaan van het fundamenteel diagram	14
2.3.2 Algemene vormen van het fundamenteel diagram.....	16
2.3.3 Het kritieke punt van het fundamenteel diagram	16
2.3.4 Het fundamenteel diagram en een bottleneck	17
2.3.5 Het omgekeerde lambda fundamenteel diagram.....	17
2.3.6 Verschillende congestiepatronen.....	18
2.3.7 Conclusie.....	19
3. Modelleren van het verkeer in drie fasen	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Basisbegrippen van de drie-fasen theorie.....	22
3.2.1 Free flow	22
3.2.2 Synchronization flow	22
3.2.3 Wide moving jam	23
3.2.4 Narrow moving jam	23
3.2.5 De hypothese	24
3.2.6 Het intensiteit-dichtheid figuur	24
3.3 Faseovergangen.....	25
3.3.1 Inleiding	25
3.3.2 De overgang van free flow, via synchronized flow, naar wide moving jam.....	26
3.3.3 De kans op een verstoring	26
3.3.4 Hypothesen behorende bij de faseovergangen	27
3.3.5 De F->J overgang	27
3.4 Verschillende patronen.....	28
3.4.1 Synchronized flow pattern	28
3.4.2 General pattern	29
3.4.3 Expanded congested pattern.....	30
3.5 Bottlenecks en capaciteit.....	30
3.5.1 De kans op een F->S overgang bij een invoegstrook.....	30
3.5.2 Het breakdown verschijnsel bij een invoegstrook.....	31
3.5.3 De S->J overgang als gevolg van de invoegstrook	32
3.6 De drie-fasen theorie versus het fundamenteel diagram	33
4. Het simulatieprogramma	35
4.1 Het programma.....	35
4.2 Wiskundig model	36
4.3 De resultaten.....	41
4.3.1 Case 1	42
4.3.2 Case 2	43
4.3.3 Case 3	44
4.3.4 Case 4.....	45
4.3.5 Case 5	46
4.3.6 Case 6	47
4.3.7 Case 7	48
4.3.8 Case 8	49
4.3.9 Case 9	50

4.3.10 Case 10	51
4.4 Conclusie	52
5. Conclusie	53
Referenties	54

1. Inleiding

Het aantal voertuigen op de Nederlandse wegen is de laatste jaren enorm toegenomen. Zo waren er in 1994 nog zo'n 5.5 miljoen personenauto's in Nederland en halverwege 2005 waren dit er al 7 miljoen. Niet alleen het aantal voertuigen is toegenomen, maar ook het autogebruik. In 1996 werd er namelijk in totaal 137.4 miljard kilometer gereden in Nederland en in 2003 werd maar liefst een stijging van 8.7 miljard kilometer genoteerd. Tengevolge van de stijging van het aantal voertuigen en het weggebruik, is ook het aantal files gestegen. In het jaar 2004 was er maar liefst sprake van 36.699 files, terwijl dit in het jaar 1998 er nog maar 23.231 waren [1].

Om meer inzicht te verkrijgen in de oorzaak van filevorming en tevens om een oplossing hiervoor te vinden, zijn modellen nodig om het gedrag van het verkeer te kunnen beschrijven. Sinds de jaren '50 zijn er verscheidene van zulke modellen ontwikkeld.

Deze modellen zijn in twee groepen te verdelen; één groep waarbij het verkeer in twee fasen wordt gemodelleerd en één groep waarbij drie fasen worden gebruikt. Welke manier (dus het modelleren in twee of in drie fasen) nu het beste inzicht in de verkeersstroom geeft, zal in dit BWI-werkstuk uitgebreid onderzocht worden. Het doel van dit BWI-werkstuk is daarom dan ook antwoord te geven op de volgende vragen:

Zijn er verschillen waar te nemen tussen het modelleren van het verkeer in twee fasen en het modelleren van het verkeer in drie fasen. Zo ja, welke methode levert dan de beste en meest bruikbare resultaten.

Om deze vergelijking tussen de beide methoden te kunnen maken en daar uiteindelijk conclusie uit te kunnen trekken, is dit BWI-werkstuk als volgt ingedeeld: In Hoofdstuk 2 zal het modelleren in twee fasen, ook wel bekend als de theorie behorende bij het fundamenteel diagram, besproken worden na een korte beschrijving van de belangrijkste variabelen en begrippen van de verkeerstheorie. In Hoofdstuk 3 zal uitgebreid aandacht geschonken worden aan het modelleren in drie fasen, hetgeen bekend staat als de drie-fasen theorie.

Deze twee verschillende aanpakken in de verkeerstheorie zullen vervolgens met elkaar vergeleken worden, in eerste instantie aan de hand van de theoretische kennis en uiteindelijk op basis van de resultaten van een simulatiemodel welke in Hoofdstuk 4 gepresenteerd worden.

2. Modelleren van het verkeer in twee fasen

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste variabelen en begrippen uit de verkeerstheorie besproken worden. Vervolgens zal een beschrijving worden gegeven van het zogenoemde fundamenteel diagram welke gebruikt wordt bij het modelleren van het verkeer in twee fasen. Hierbij worden de intensiteit en de dichtheid die de drukte van de weg aangeven in een figuur gepresenteerd.

2.1 Variabelen

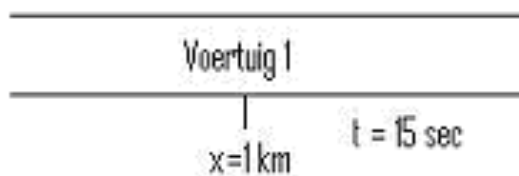
De belangrijkste variabelen in de verkeerstheorie zijn de intensiteit, de dichtheid en de snelheid [3], die alle zowel afhankelijk van plaats, x , als van tijd, t , zijn.

Intensiteit

De intensiteit, $q(x,t)$, geeft aan hoeveel voertuigen, N , er per tijdseenheid, Δt , een bepaalde plaats, x , van de weg passeren. De intensiteit wordt dan ook gedefinieerd door

$$q(x,t) = \frac{N}{\Delta t}.$$

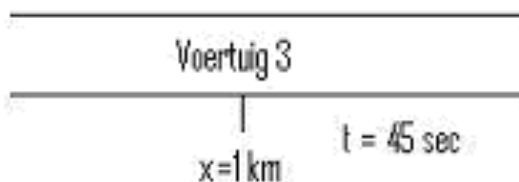
In figuur 1a tot en met figuur 1d wordt de intensiteit geïllustreerd voor een tijdsinterval van één minuut, waarbij op één kilometer stroomopwaarts (dit begrip zal in 2.2 nader toegelicht worden) het aantal voertuigen wordt bijgehouden. Aangenomen is hierbij dat de tijdseenheid één minuut is.



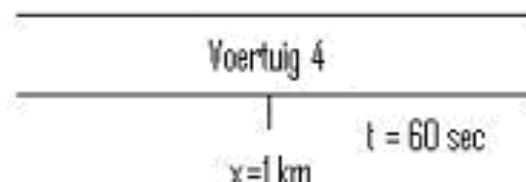
Figuur 1a: Voertuigen x gepasseerd bij 15 sec.



Figuur 1b: Voertuigen gepasseerd bij 30 sec.



Figuur 1c: Voertuigen x gepasseerd bij 45 sec.



Figuur 1d: Voertuigen gepasseerd bij 60 sec.

Tijdens het tijdsinterval van één minuut worden er vier voertuigen genoteerd (één na 15 seconden, één na 30 seconden, één na 45 seconden en één na 60 seconden) waardoor de intensiteit hier $4/1 = 4$ is.

Dichtheid

De dichtheid, $\rho(x,t)$, geeft het aantal voertuigen op een bepaald weggedeelte, Δx , voor een tijdstip t en is daardoor een plaatsbepaling in tegenstelling tot de intensiteit hetgeen een tijdsbepaling is. De dichtheid kan als volgt worden gedefinieerd

$$\rho(x,t) = \frac{N}{\Delta x}.$$

In figuur 2 wordt een weggedeelte van een éénbaansweg afgebeeld van één kilometer stroomopwaarts tot aan twee kilometer stroomopwaarts waardoor nu Δx één kilometer is.



Figuur 2: Dichtheid voor $\Delta x = 1\text{ km}$.

In figuur 2 bevinden zich drie voertuigen op tijdstip t , waardoor de dichtheid, in het interval $[1\text{ km}, 2\text{ km}]$, $3/1 = 3$ is.

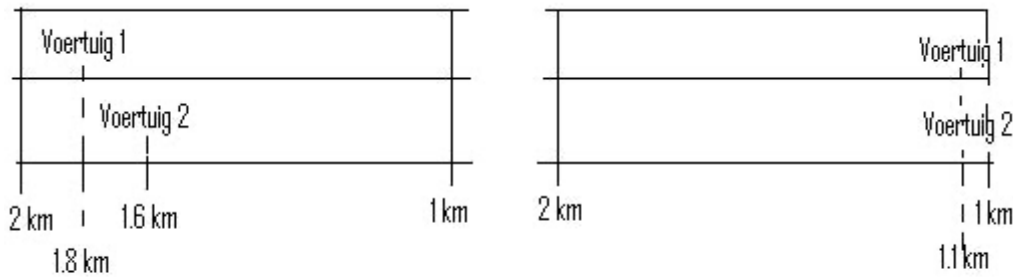
Snelheid

Wanneer de afgelegde afstand binnen een bepaald tijdsinterval bekend is, kan daarmee de gemiddelde snelheid, $v(x,t)$, in dat tijdsinterval berekend worden voor een bepaald weggedeelte voor de voertuigen. Hierbij zijn x en t respectievelijk de plaats op de weg van de voertuigen en het tijdstip na het tijdsinterval. De berekening van de snelheid geschiedt door eerst de snelheid per voertuig, v_j , te bepalen en deze vervolgens te sommeren en te delen door het aantal voertuigen dat zich binnen het bepaald weggedeelte bevindt.

$$v_j = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

$$v(x,t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j.$$

In figuur 3 wordt een weggedeelte van een tweebaansweg van één kilometer weergegeven waarvoor in een tijdsinterval van één minuut de afgelegde weg van twee voertuigen wordt bepaald.



Figuur 3: Afgelegde weg van twee voertuigen in één minuut voor de bepaling van de snelheid.

De afgelegde weg voor voertuig 1 en voertuig 2 zijn respectievelijk 0.7 km en 0.5 km. De snelheid van voertuig 1 is hier dan nu $0.7/1 = 0.7$ km/minuut, oftewel 42 km/uur ($0.7 \cdot 60$) en de snelheid van voertuig 2 is $0.5/1 = 0.5$ km/minuut, oftewel 30 km/uur ($0.5 \cdot 60$). De gemiddelde snelheid van de voertuigen voor dit weggedeelte voor dit tijdsinterval is nu $(42+30)/2 = 36$ km/uur.

2.2 Begrippen

In de verkeerstheorie wordt van een aantal begrippen gebruik gemaakt. De begrippen die ook in dit BWI-werkstuk voorkomen, zullen hieronder kort worden toegelicht.

Stroomopwaarts en stroomafwaarts

De verkeersomstandigheden van een voertuig op plaats x van de weg zijn afhankelijk van de omstandigheden die zich vlak voor en vlak achter het voertuig voordoen. Om deze omstandigheden aan te duiden worden de begrippen stroomopwaarts en stroomafwaarts gebruikt. In figuur 4 is afgebeeld hoe stroomopwaarts en stroomafwaarts zich precies tot elkaar en tot een voertuig verhouden.



Figuur 4: Stroomopwaarts en stroomafwaarts. Hierbij geeft de pijl aan welke kant het voertuig opgaat.

Bottlenecks

Een *bottleneck* is een locatie op de weg die een verkeersopstopping kan veroorzaken doordat er omstandigheden zijn waardoor het verkeer minder wegcapaciteit tot zijn beschikking krijgt. Gedacht kan hier bijvoorbeeld worden aan in- en uitvoegstroken, werk aan de weg of een ongeluk.

Verder bestaat ook het begrip *geïsoleerde bottleneck* in de verkeerstheorie. Dit is een bottleneck die genoeg afstand heeft tot andere bottlenecks waardoor er bij de bottleneck, zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts, een verkeerspatroon kan ontstaan dat gerelateerd is aan die specifieke bottleneck.

Capaciteit

De capaciteit van de weg geeft aan wat de maximale intensiteit van voertuigen is die een gedeelte van de weg aankan voordat er sprake zal zijn van een file.

Free flow en congestie

In de theorieën die worden besproken in de literatuur wordt niet gesproken van wel of geen file, maar worden de termen *free flow* en *congestie* gebruikt.

Free flow staat voor de situatie dat elke bestuurder zijn gewenste snelheid kan rijden. Er zal in deze situatie geen vertraging ontstaan wanneer een voertuig bijvoorbeeld van baan verandert of licht afremt.

Wanneer er sprake is van congestie is de gemiddelde snelheid lager dan de minimaal mogelijke gemiddelde snelheid in free flow [5]. Congestie zal voornamelijk voorkomen bij een *bottleneck*, zoals een invoegstrook of een gedeelte van de weg waar werk in uitvoering is. Uit onderzoek [5] is gebleken dat congestie vaak gepaard gaat met het *breakdown* verschijnsel, hetgeen wil zeggen dat er een sterke daling is in de snelheid van de voertuigen bij de bottleneck [4]. De complexe plaats-tijd patronen die zich onder de congestie omstandigheden voordoen, zijn de patronen die de verkeerstheorie zo ingewikkeld maken.

Homogeen en stationair verkeer

Wanneer er in een verkeerstheorie sprake is van homogeen verkeer zal er gekeken worden naar identieke voertuigen. De benaming stationair verkeer gaat er vanuit dat de verkeerssituatie in de loop der tijd niet verandert. Indien er sprake is van zowel homogeen als stationair verkeer, wordt er ook wel gesproken van *steady state* omstandigheden.

De fundamentele vergelijking

Indien er twee van de drie meest belangrijke verkeersvariabelen ($q(x,t)$, $\rho(x,t)$ en $v(x,t)$) bekend zijn, kan altijd ook de derde variabele berekend worden door middel van een unieke vergelijking:

$$q(x,t) = \rho(x,t) * v(x,t).$$

Deze vergelijking staat bekend als de fundamentele vergelijking en kan worden gebruikt bij het fundamenteel diagram welke in de volgende paragraaf wordt besproken.

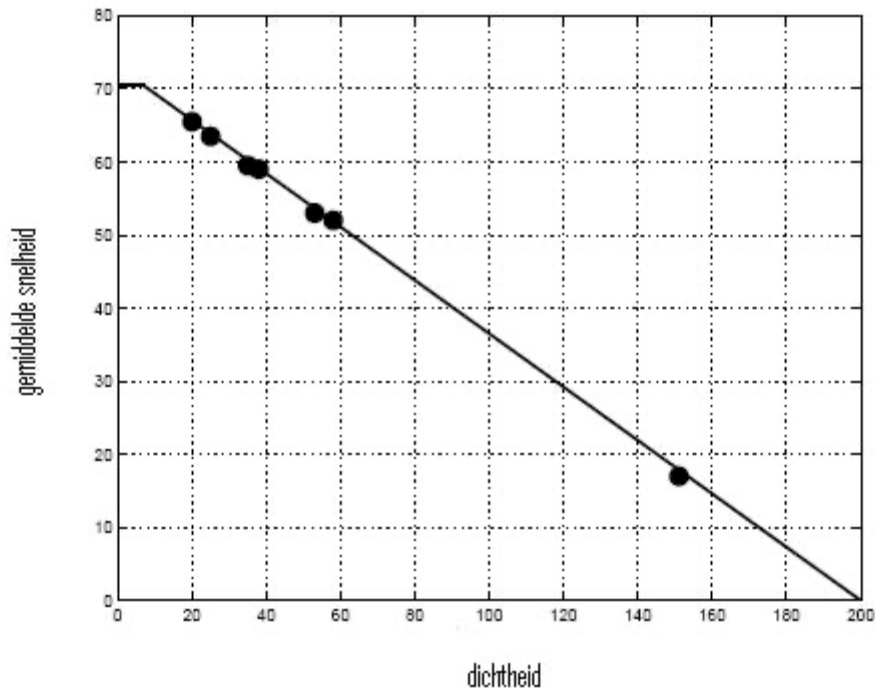
2.3 Fundamenteel diagram

Bij het modelleren van het verkeer in twee fasen wordt gebruik gemaakt van het fundamenteel diagram waarbij de unieke relatie wordt getoond tussen twee van de drie belangrijkste variabelen van de verkeerstheorie (intensiteit, dichtheid en snelheid). Hieronder zal dieper op de theorie behorende bij het fundamenteel diagram worden ingegaan.

2.3.1 Het ontstaan van het fundamenteel diagram

Greenshield heeft de basis geleverd voor het fundamenteel diagram door zeven verschillende waarden van de dichtheid te meten op een weg en de daarbij behorende gemiddelde snelheid.

Deze data zijn afgebeeld in figuur 5 als de zwarte punten. Door hier een lijn doorheen te trekken schetste Greenshields een lineaire relatie tussen de dichtheid en de gemiddelde snelheid, zoals in figuur 5 getoond is, die gebaseerd zijn op empirisch verkregen data [6].



Figuur 5: Lineaire relatie van Greenshields, waarbij de zwarte punten de verkregen data voorstelt. Bron: [12].

In deze lineaire relatie heeft Greenshields aangenomen dat bestuurders langzamer zullen gaan rijden wanneer er meer verkeer op de weg is, als er dus sprake is van een hogere dichtheid. Echter blijkt zijn lineaire relatie niet goed genoeg te zijn, doordat er niet genoeg data is gebruikt en omdat de meeste metingen onder de free flow omstandigheden zijn verricht (zoals is beschreven in [12]).

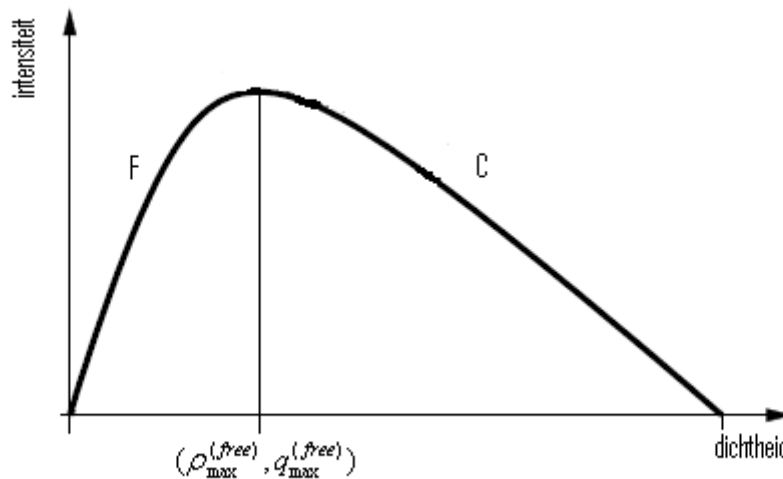
Lighthill en Whitham komen vervolgens met de fundamentele hypothese [12] die gebaseerd is op de lineaire relatie van Greenshields:

“at any point of the road, the flow q is a function of the density ρ ”

Hiermee ontwikkelen Lighthill en Whitham de *flow-concentration curve*. Deze curve is gebaseerd op homogene en stationaire omstandigheden en beschrijft daardoor de gemiddelde kenmerken van het verkeer, dus bij een bepaalde dichtheid hoort volgens hun curve een gemiddelde intensiteit.

Nadien zijn er veel onderzoekers geweest die hun model op de fundamentele hypothese van Lighthill en Whitham hebben gebaseerd, echter werd er niet meer gesproken van de fundamentele hypothese maar van het diagram dat deze hypothese representeert: het fundamenteel diagram [12].

Het fundamenteel diagram wordt weergegeven in figuur 6 met de dichtheid op de x-as en de intensiteit op de y-as. Verder staat ook het kritieke punt in figuur 6 afgebeeld waarover in 2.3.3 verder op wordt ingegaan waarin tevens ook de lijnen F en C besproken worden.



Figuur 6: Het fundamenteel diagram waarbij de dichtheid tegen de intensiteit is uitgezet, met $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ het kritieke punt.

2.3.2 Algemene vormen van het fundamenteel diagram

Behalve de relatie tussen de intensiteit en de dichtheid kan een fundamenteel diagram ook andere relaties representeren. Deze vormen van het fundamenteel diagram bevatten de relatie tussen de snelheid en de intensiteit en de relatie tussen de snelheid en de dichtheid. Beide vormen zijn, net als wanneer de intensiteit tegen de dichtheid wordt uitgezet, ééndimensionale evenwichtsrelaties onder homogene en stationaire omstandigheden waardoor er een keurige curve gevormd kan worden. Uit alle drie de vormen van het fundamenteel diagram kan dankzij de fundamentele vergelijking de derde belangrijke variabele gehaald worden.

Voor de verdere bespreking van het fundamenteel diagram, zal gebruik gemaakt worden van het figuur waarin de dichtheid tegen de intensiteit is uitgezet, waarbij de gemiddelde snelheid bepaald kan worden door de helling te nemen van de oorsprong tot een punt op de curve bij een zekere dichtheid en intensiteit of door de fundamentele vergelijking.

2.3.3 Het kritieke punt van het fundamenteel diagram

In het fundamenteel diagram wordt aangenomen dat de maximale intensiteit bereikt wordt bij het kritieke punt $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$. Wanneer de dichtheid groter is dan bij dit kritieke punt, heeft er een faseovergang plaatsgevonden van free flow naar congestie. In deze congestiefase ontstaan er *moving jams*, volgens de modellen die gebruik maken van het fundamenteel diagram [5].

Vanaf de dichtheid, q , gelijk aan 0 tot aan het kritieke punt stijgt de intensiteit in meerdere of mindere mate lineair, deze lijn wordt ook wel de free flow lijn (F) genoemd van het

fundamenteel diagram. Tijdens de free flow zullen kleine verstoringen in de verkeersstroom, zoals een voertuig dat afremt omdat de bestuurder een reclamebord leest, geen invloedrijke effecten hebben.

Vlakbij het kritieke punt wordt het verkeer *metastable* genoemd, wat wil zeggen dat het verkeer in geval van kleine storingen stabiel zal zijn; wanneer deze verstoringen echter groot genoeg zijn kunnen ze leiden tot een waterval van effecten, hetgeen resulteert in een verlaging van de snelheid, een verhoogde dichtheid en uiteindelijk in congestie.

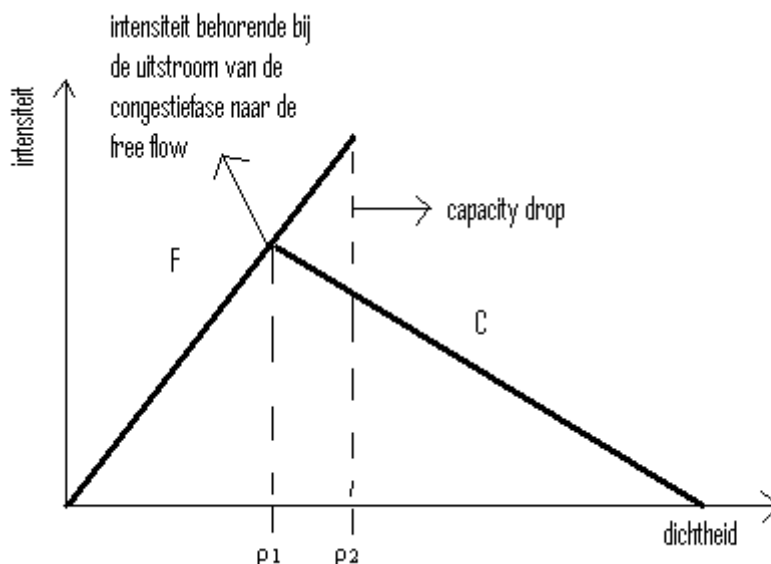
Vanaf het kritieke punt zal de intensiteit dalen (volgens de congestielijn C in figuur 6) wanneer de dichtheid blijft stijgen totdat er een volledige opstopping is, wat een intensiteit van nul inhoudt.

2.3.4 Het fundamenteel diagram en een bottleneck

In de loop der jaren zijn er ook modellen ontwikkeld die rekening houden met een *bottleneck*, zoals bijvoorbeeld een invoegstrook. Hierbij zullen de verkeersomstandigheden onder free flow exact beschouwd worden zoals hierboven beschreven is. Echter zullen nu door een toenemende intensiteit op de invoegstrook spontaan moving jams kunnen ontstaan in de free flow. Dit zal gebeuren stroomopwaarts van een invoegstrook wanneer de intensiteit hier hoog genoeg is.

2.3.5 Het omgekeerde lambda fundamenteel diagram

In de jaren '60 namen onderzoekers vaak een discontinuïteit waar vlakbij het kritieke punt $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$. Om deze reden stelde Edie (zoals is beschreven in [12]) een model voor die deze discontinuïteit meenam. Deze vorm van het fundamenteel diagram zoals te zien in figuur 7 met de dichtheid op de x-as en de intensiteit op de y-as, staat tegenwoordig bekend als de omgekeerde lambda-vorm.



Figuur 7: Het fundamenteel diagram als omgekeerde lambda.

Deze omgekeerde lambda-vorm resulteert wel in een overlappende regio van data voor free-flow en congestie, dat wil zeggen dat de intensiteit hier twee verschillende waarden kan

aannemen volgens deze vorm van het fundamenteel diagram. Wanneer de dichtheid een waarde heeft die tussen ρ_1 en ρ_2 ligt kan de intensiteit de waarde aannemen behorende bij lijn F (free flow) of de waarde behorende bij lijn C (congestie). Welke waarde de intensiteit daadwerkelijk aanneemt zal afhangen van de verkeersomstandigheden, dat wil zeggen of er sprake is van free flow dat richting de congestiefase gaat of andersom.

De discontinuïteit waarop deze omgekeerde lambda-vorm gebaseerd is, hangt samen met de *capacity drop*, ofwel de verlaging in de intensiteit die plaatsvindt bij de faseovergang bij het kritieke punt van free flow naar congestie. Om vanuit de congestie weer terug te kunnen keren naar de free flow omstandigheden, zal de dichtheid verlaagd dienen te worden tot onder het kritieke punt waardoor de intensiteit na de faseovergang van congestie naar free flow niet gelijk zal zijn aan de maximale intensiteit maar aan de uitstroom van de congestie welke lager zal zijn dan $q_{\max}^{(free)}$. Dit proces staat ook wel bekend als het hysterische gedrag.

2.3.6 Verschillende congestiepatronen

Helbing kwam eind jaren negentig met een theorie die is ontwikkeld op basis van een simulatie waar een gebied rond een invoegstrook werd bekeken voor verschillende waarden van de intensiteiten [13]. Deze theorie is gebaseerd op het fundamenteel diagram en gaat dus uit van de unieke evenwichtsrelatie tussen de dichtheid en de intensiteit, maar hij gaat niet meer alleen uit van een enkele congestietoestand. Helbing kon namelijk in de resultaten van zijn simulatie meerdere congestiepatronen onderscheiden die af bleken te hangen van de verkeersvariabelen, zoals de intensiteit van de uitstroom van de congestie en de gemiddelde intensiteit in de kop van de congestie.

In zijn theorie onderscheidt Helbing vijf verschillende patronen van congestie, welke weer opgedeeld kunnen worden in twee groepen; patronen behorende bij een lage intensiteit op de weg en patronen behorende bij een hoge intensiteit op de weg.

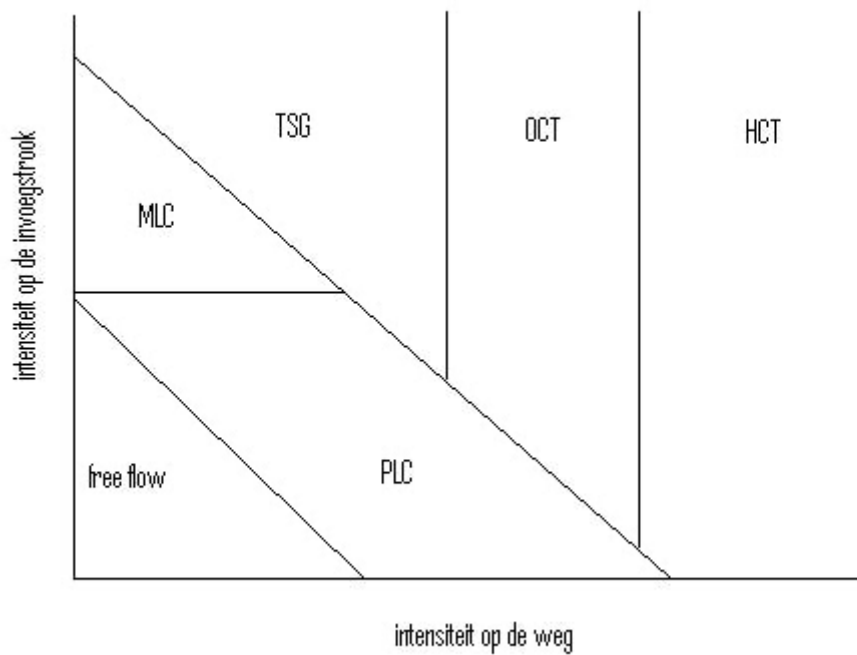
Bij de eerste categorie ontstaan er volgens Helbing smalle congestieclusters: de Pinned Localised Cluster (PLC) en de Moving Localised Cluster (MLC).

De PLC is een lichte vorm van congestie die op eenzelfde plek blijft liggen, bijvoorbeeld bij een invoegstrook. De MLC is een bewegend lichte vorm van congestie die zich stroomopwaarts voortbeweegt.

Tot de tweede groep behoren de “Triggered stop-and-go waves” (TSG), de “Oscillatory Congested Traffic” (OCT) en de “Homogeneous Congested Traffic” (HCT).

Door het stijgen van de intensiteit herhaald een golvende congestievorm zich, hetgeen leidt tot de TSG. Bij nog hogere intensiteiten volgen deze golven elkaar zo dicht op dat er een ander patroon ontstaat, het Oscillating Congested Traffic (OCT). Tot slot bestaat er ook nog het Homogeneous Congested Traffic (HCT), dit congestiepatroon zal zich alleen voordoen bij zeer hoge intensiteit bij een homogeen aaneengesloten filepatroon.

In figuur 8 staan deze verschillende congestiepatronen afgebeeld, waarbij er sprake zal zijn van een zwaarder congestiepatroon naar mate een intensiteit stijgt. Deze afbeelding is gebaseerd op een bepaald gedeelte van een weg waartoe ook een invoegstrook behoort.



Figuur 8: Verschillende congestiepatronen volgens Helbing.

2.3.7 Conclusie

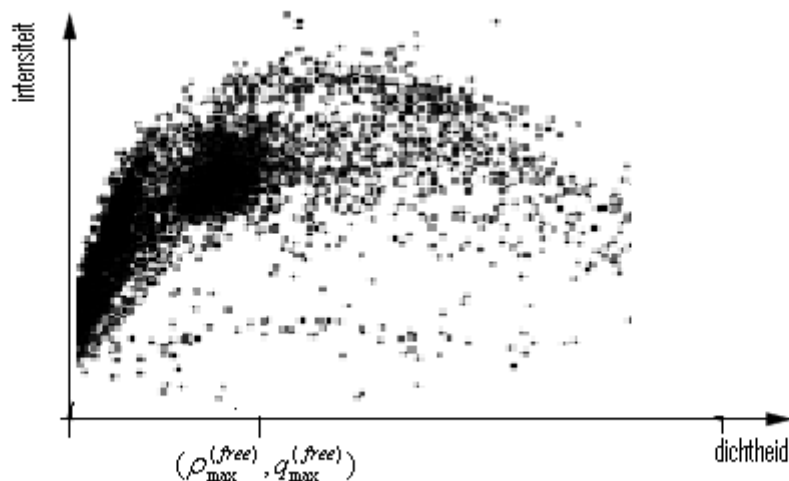
Bij het modelleren van het verkeer in twee fasen is het fundamenteel diagram in de loop der tijd gebruikt door vele onderzoekers in verschillende vormen. Bij het gebruik van het fundamenteel diagram worden altijd *steady state* omstandigheden in acht genomen, hetgeen zorgt voor een ééndimensionale curve.

3. Modelleren van het verkeer in drie fasen

In dit hoofdstuk zal uitgebreid stil worden gestaan bij de drie-fasen theorie die ontwikkeld is door Boris Kerner en waarbij (de naam zegt het al) het verkeer gemodelleerd wordt in drie fasen. Eerst zal uitgelegd worden wat Kerner motiveerde tot het ontwikkelen van zijn theorie. Vervolgens zullen de drie fasen verder beschreven worden om daarna de faseovergangen daartussen te kunnen bespreken. Extra aandacht zal er vervolgens zijn voor de vraag hoe de congestie zich volgens de drie-fasen theorie gedraagt in de aanwezigheid van een bottleneck. Tot slot zal het hoofdstuk worden afgesloten met een theoretische vergelijking tussen het fundamenteel diagram en de drie-fasen theorie zoals deze tot dan toe besproken zijn.

3.1 Inleiding

Boris Kerner heeft grote twijfels over het fundamenteel diagram door een drietal kernpunten. Ten eerste doordat het fundamenteel diagram verkregen wordt door enkel naar homogene en stationaire omstandigheden te kijken. Wanneer er empirisch verkregen datapunten worden geplot in het fundamenteel diagram, blijken de datapunten niet keurig op de lijnen van het fundamenteel diagram te liggen, maar meer door het figuur heen gespreid te zijn [12]. De empirische maatstaven laten dus geen ééndimensionale curve zien die corresponderen met het fundamenteel diagram, zoals te zien is in figuur 9.



Figuur 9: Empirische datapunten in het fundamenteel diagram.

Dat de datapunten niet keurig op de lijn liggen komt doordat, met name tijdens de congestiefase, er complexe plaats-tijd verkeerspatronen te observeren zijn welke Kerner graag beter wil kunnen bestuderen omdat deze plaatselijk niet homogeen en stationair blijken te zijn [5]. Bovendien, door het in acht nemen van de homogene en stationaire omstandigheden bij het fundamenteel diagram, wordt er een gemiddelde van de verkeersvariabelen genomen, die gerelateerd zouden zijn aan één vorm van congestie.

Ten tweede is uit empirisch onderzoek gebleken dat de faseovergangen in de verkeersstroom kwalitatief verschillen met de kenmerken die volgen uit wiskundige verkeersmodellen die gebruik hebben gemaakt van het fundamenteel diagram [5].

Als derde punt lijken *moving jams* tot slot bij het fundamenteel diagram spontaan te ontstaan in free flow stroomopwaarts van een invoegstrook wanneer de intensiteit stroomopwaarts van de invoegstrook hoog genoeg is en de intensiteit van de invoegstrook geleidelijk toeneemt startend vanaf nul. Ook dit lijkt sterk in conflict met empirisch verkregen data, waardoor de twijfels van Kerner zijn toegenomen [9].

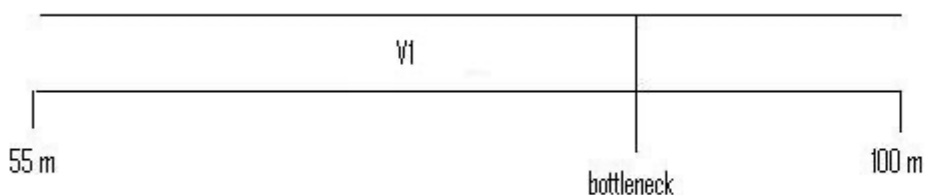
Door de observatie van een rijke en complexe set van empirische tijd-plaats patronen in verkeer dat zich in de congestiefase bevindt en de daarop gebaseerde twijfels over het fundamenteel diagram, besluit Kerner de hypothese van het fundamenteel diagram af te schaffen en met een nieuwe theorie te komen: de drie-fasen theorie [12].

Met de drie-fasen theorie splitst Kerner de congestie fase in twee verschillende fasen: de *synchronization flow* en de *wide-moving-jam* [12] die zich onderscheiden door verschillende plaats-tijd kenmerken. Samen met de free flow is zijn theorie dus gebaseerd op drie verschillende fasen, in tegenstelling tot de theorie behorende bij het fundamenteel diagram waarbij van twee fasen wordt uitgegaan: free flow en congestie.

3.2 Basisbegrippen van de drie-fasen theorie

3.2.1 Free flow

De free flow houdt in de drie-fasen theorie hetzelfde in als de free flow die gebruikt wordt in het fundamenteel diagram; in deze fase kunnen bestuurders hun voertuig besturen met de wenselijke snelheid, zoals te zien is in figuur 10 waarin een voertuig, v_1 , alle ruimte heeft om de snelheid te behalen die voor hem wenselijk is.



Figuur 10: Voorbeeld van free flow, met v_1 een voertuig.

3.2.2 Synchronization flow

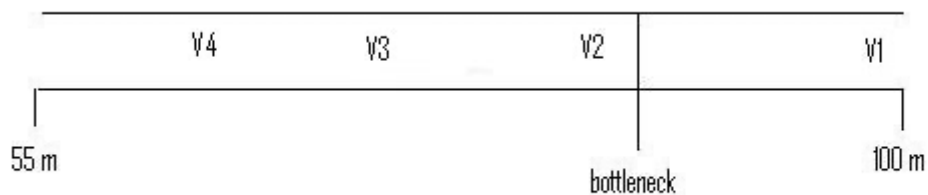
Voertuigen in de synchronization flow zijn te zien als een ononderbroken verkeersstroom, waarin bestuurders niet meer in staat zijn om de wenselijke snelheid te behalen, al is er in deze fase nog geen sprake van stilstaand verkeer [12]. De benaming synchronization is ontleend aan de typische synchronisatie die onder deze omstandigheden tussen de banen en op de baan zelf, in het congestie verkeer plaats vindt. Dit wil zeggen dat er hier wordt uitgegaan dat niet op alle banen de gemiddelde snelheid dezelfde zal zijn en ook niet op een enkele baan

doordat de voertuigen niet allemaal op hetzelfde moment remmen en optrekken en verschillende afstanden behouden tot hun voorganger.

De kop van de synchronized flow ligt vaak vast bij een bottleneck [10]. Vanuit deze kop zullen bestuurders weer optrekken tot hun wenselijke snelheid en dus weer in de free flow terecht komen.

Wanneer er een hoge dichtheid en een lage snelheid in de synchronization flow wordt gerealiseerd, dus wanneer er een sterke compressie bestaat, ontstaat het zogenaamde *pinch effect*, waardoor er moving jams ontstaan [7].

In figuur 11 wordt een voorbeeld gegeven van een synchronization flow, waarbij de kop dus vast ligt bij een bottleneck en bestuurders niet meer hun wenselijke snelheid kunnen behalen.



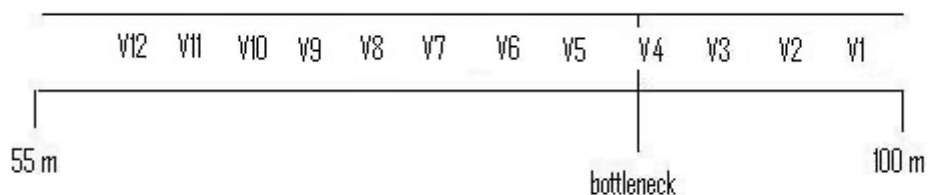
Figuur 11: Voorbeeld van synchronization flow.

3.2.3 Wide moving jam

Een wide moving jam is een compacte groep voertuigen waarbij de snelheid lager is dan in de synchronization flow, of zelfs nul is. Bovendien is de intensiteit hier laag, in tegenstelling tot de synchronization flow waar deze nog hoog is [12].

Wat een wide moving jam verder onderscheidt van de synchronization flow is dat het zich verplaatst onder alle verkeersomstandigheden, ook langs bottlenecks, zoals invoegstroken, terwijl de snelheid van de kop van de wide moving jam stroomafwaarts gelijk blijft [8].

Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in figuur 12.



Figuur 12: Voorbeeld van een wide moving jam.

3.2.4 Narrow moving jam

Een narrow moving jam is een moving jam die niet het karakteristieke kenmerk van een wide moving jam heeft, namelijk dat de kop van de jam zich verplaatst onder alle

verkeersomstandigheden. De kop van de narrow moving jam zal namelijk net als de synchronization flow vastliggen bij een bottleneck. Echter zal wel de intensiteit bij een narrow moving jam vrij laag zijn net als bij een wide moving jam.

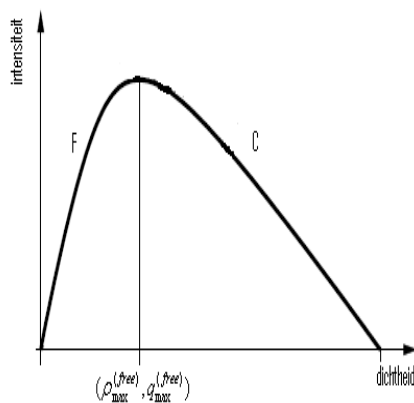
Narrow moving jams behoren uiteraard wel tot congestie verkeer, maar zullen worden ingedeeld bij de synchronization flow.

3.2.5 De hypothese

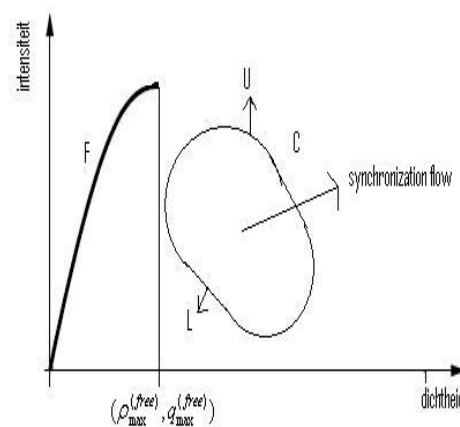
Kerner heeft de hypothese van zijn drie-fasen theorie gebaseerd op gemeenschappelijke fundamentele gedragskenmerken van bestuurders en de gevolgen daarvan, zoals die zijn geobserveerd op snelwegen [5]. De fundamentele hypothese van de drie-fasen theorie klinkt als volgt:

“Hypothetical steady state of synchronized flow cover a two-dimension region in the flow-density plane”.

Dit wil zeggen dat, onder hypothetische homogene en stationaire omstandigheden, een gegeven homogeen en stationair voertuig gerelateerd is aan een oneindige hoeveelheid verschillende dichtheden en een gegeven dichtheid gerelateerd is aan een oneindig aantal verschillende snelheden. Er wordt hier dus geen gebruik meer gemaakt van een curve als bij het fundamenteel diagram waarbij er een unieke relatie wordt weergegeven tussen de gemiddelden waarden van de dichtheid en de intensiteit, maar er wordt een regio gedefinieerd van alle combinaties van de waarden van de dichtheid en de intensiteit waarin een voertuig zich kan bevinden.



Figuur 13a: Het fundamenteel diagram.



Figuur 13b: De intensiteit tegen de dichtheid volgens de drie-fasen theorie, bron: [5].

3.2.6 Het intensiteit-dichtheid figuur

In figuur 13b, waarin de intensiteit wordt afgezet tegen de dichtheid wordt de hypothese van de drie-fasen theorie afgebeeld. Volgens Kerner kunnen door middel van dit diagram de complexe plaats-tijd congestiepatronen beter worden uitgelegd. In figuur 13 a is nogmaals het fundamenteel diagram afgebeeld om duidelijk het verschil te kunnen zien.

Kerner maakt dus geen gebruik meer van een enkele curve in het intensiteit-dichtheid figuur, maar van een tweedimensionale oppervlakte. Deze homogene en stationaire omstandigheden in de synchronized flow in het intensiteit-dichtheid figuur, zijn ingesloten door een bovengrens, U , en een ondergrens, L . De bovengrens heeft betrekking op de veilige afstanden die voertuigen van elkaar nemen om botsingen te voorkomen en wordt bepaald door de afstand van de voorbumper van de eerste auto ten opzichte van de voorbumper van de tweede auto en de snelheid. De ondergrens is gebaseerd op een synchronisatieafstand D , hetgeen betekent dat gebruikers de maximale afstand tot de voorganger opnemen wanneer zij optrekken. Verder correspondeert de linkerlijn F met de maximale snelheid in free flow waarbij op het maximale punt van lijn F het kritieke punt $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ zich bevindt [7]. Deze tweedimensionale regio geldt zowel voor éénbaanswegen als voor meerbaanswegen. Bovendien, wanneer er naar niet-homogene en niet-stationaire omstandigheden gekeken wordt, zal de synchronized flow ongeveer dezelfde 2-dimensionale regio bedekken [4].

3.3 Faseovergangen

3.3.1 Inleiding

De overgang van de ene fase naar de andere fase gaat gepaard met een eerste orde faseovergang, dat wil zeggen dat de faseovergang gepaard gaat met het breakdown verschijnsel (een verlaging in de snelheid), hysterisch gedrag en groeperingeffecten van de voertuigen [8].

Voor een faseovergang dient er een verstoring plaats te vinden in de verkeersvariabelen. Het is echter afhankelijk van de dichtheid op een locatie in hoeverre een verstoring invloed heeft en of er daardoor daadwerkelijk een faseovergang plaatsvindt.

Wanneer de dichtheid evenredig is aan de dichtheid bij het kritieke punt $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$, dan zal iedere verstoring, hoe klein ook, leiden tot een faseovergang. Als de dichtheid echter kleiner is dan het kritieke punt, dan zal de verstoring een zekere grootte moeten hebben alvorens er een faseovergang zal plaatsvinden [7].

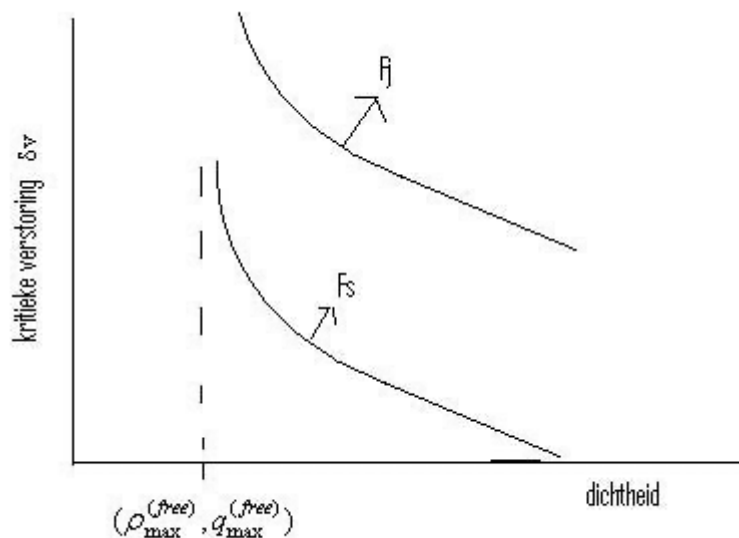
In totaal zijn er zes verschillende faseovergangen mogelijk in de drie-fasen theorie, namelijk van free flow naar de synchronization flow ($F \rightarrow S$), van de synchronization flow naar wide moving jam ($S \rightarrow J$), van free flow naar wide moving jam ($F \rightarrow J$). Uiteraard zijn al deze faseovergangen ook de andere kant op mogelijk, dus van wide moving jam naar de synchronization flow ($J \rightarrow S$), van de synchronization flow naar free flow ($S \rightarrow F$) en van wide moving jam naar de free flow ($J \rightarrow F$).

De overgang van het free flow verkeer naar wide moving jam wordt in de drie-fasen theorie bijna altijd gekarakteriseerd door twee opeenvolgende faseovergangen: namelijk van de free flow naar de synchronization flow en van de synchronization flow naar de wide moving jam [4]. De beredenering van deze twee opeenvolgende faseovergangen volgt hieronder.

3.3.2 De overgang van free flow, via synchronized flow, naar wide moving jam

Zoals hierboven al is beschreven, is er een verstoring nodig van de verkeersvariabelen die een voldoende grote verandering brengt in de verkeersomstandigheden alvorens er een faseovergang plaatsvindt. Echter, wanneer er sprake is van free flow, is de kritieke verstoring, δv , die nodig is voor een F->S overgang (lijn Fs in figuur 14) bij een bepaalde dichtheid lager dan de kritieke verstoring die nodig is voor een F->J overgang (lijn Fj in figuur 14) bij diezelfde dichtheid. Met andere woorden: wanneer er een kleine verstoring van de verkeersvariabelen plaatsvindt, bijvoorbeeld door het wisselen van baan door voertuigen, bestaat er eerder de mogelijkheid dat er een F->S overgang plaatsvindt dan dat er een F->J overgang geschiedt. Dit wordt ook uitgelegd door de volgende hypothese en in figuur 14 [5]:

“At each given density in free flow the critical amplitude of local perturbation in the free flow which is needed for the F->S transition is considerably lower than the critical amplitude of a local perturbation which is needed for the F->J transition”.



Figuur 14: Kritieke verstoring nodig voor een F->S overgang en een F->J overgang.

Wanneer er sprake is van de synchronization flow en er ontstaan in deze fase groeiende narrow jams, dan kunnen deze narrow jams escaleren tot een wide moving jam waarmee de S->J faseovergang voltooid is en daarmee het hele proces van F->S->J plaatsgevonden heeft [12].

3.3.3 De kans op een verstoring

De kans op een grote verstoring (voor bijvoorbeeld een F->J overgang) zal kleiner zijn dan de kans op een kleine verstoring. Zo zal het bijvoorbeeld veel vaker voorkomen dat voertuigen van baan verwisselen (wat dus een kleine verstoring kan opleveren) dan dat er een frontale botsing plaats vindt op de weg (wat voor een grote verstoring zorgt). Dus voor iedere gegeven dichtheid in free flow, zal de verwachte kans P_{FS} voor een bepaald tijdsinterval voor de gebeurtenis F->S hoger zijn dan de verwachte kans P_{FJ} voor hetzelfde tijdsinterval bij dezelfde dichtheid voor F->J.

3.3.4 Hypothesen behorende bij de faseovergangen

Het kritieke punt $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ waar er vanuit free flow een faseovergang zal plaatsvinden indien daar een verstoring plaatsvindt, zal eerder bij een F->S overgang horen dan bij een F->J overgang. Dit komt doordat, zoals hierboven al is beschreven, de verstoring voor een F->S overgang minder groot hoeft te zijn dan voor een F->J overgang, en daardoor ook de kans op een F->S overgang groter zal zijn dan de kans op een F->J overgang.

De volgende hypothesen houden dit principe ook in en zijn bovendien bevestigd door een microscopisch drie-fasen model [5]:

“The existence of the critical (limit) point of free flow $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ is linked to the F->S transition rather than with the moving jam emergence”.

“At the limit point of free flow $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ the probability of the F->S transition P_{FS} reaches one and the critical amplitude of the local perturbation for the F->S transition reaches zero”.

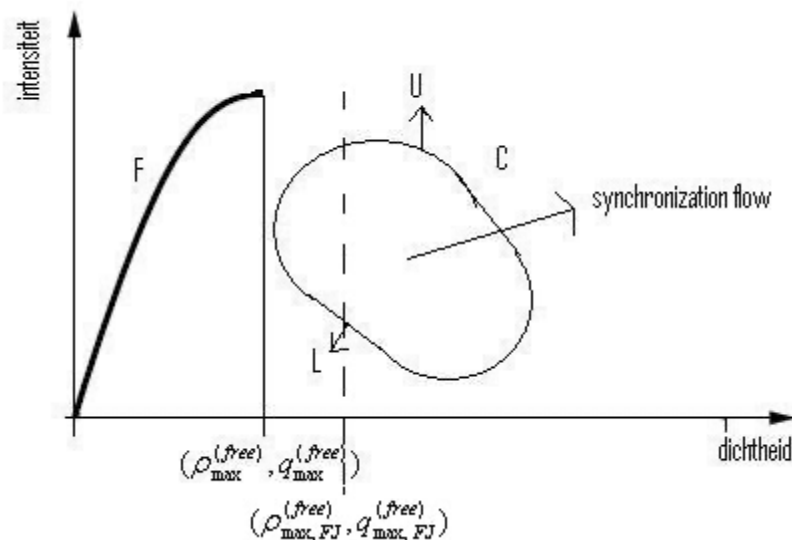
“At the limit point of free flow $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ the probability of the F->J transition is very low and consequently the critical amplitude of a local perturbation which is needed for the F->J transition is a relatively high finite value”.

3.3.5 De F->J overgang

Er zullen hieronder twee situaties geschetst worden, waardoor zal blijken waarom een F->J overgang niet logisch is.

Wanneer er een F->J overgang zou plaatsvinden, dan zal er een dusdanige kritieke verstoring moeten zijn dat de snelheid die aanwezig is in free flow in één keer terugvalt naar de snelheid die in een wide moving jam thuis hoort. Aangezien de snelheid in synchronized flow hoger ligt dan in een wide moving jam, lijkt het bijna onmogelijk dat een verstoring ervoor kan zorgen dat de snelheid die in de synchronization flow thuis hoort, simpelweg wordt overgeslagen.

Om een F->J overgang te kunnen laten plaatsvinden, zonder dat er een enorm grote verstoring voor nodig is, zou er gedacht kunnen worden aan een tweede kritieke punt in free flow $(\rho_{\max, FJ}^{(free)}, q_{\max, FJ}^{(free)})$ zoals geschetst is in figuur 15. Bij dit kritieke punt zal er nu slechts een kleine verstoring nodig zijn voor een F->J overgang.



Figuur 15: Intensiteit-dichtheid figuur met tweede kritieke punt.

Echter is de dichtheid in free flow die gerelateerd is aan $(\rho_{\max,FJ}^{(free)}, q_{\max,FJ}^{(free)})$ veel hoger dan de dichtheid die gerelateerd is aan $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$, waardoor geldt [5]:

$$\rho^{(free)} < \rho_{\max}^{(free)} < \rho_{\max,FJ}^{(free)}.$$

Wanneer nu sprake is van een dichtheid $\rho^{(free)} = \rho_{\max}^{(free)}$ zal er een F->S overgang plaatsvinden. De dichtheid kan nu wel verder stijgen, maar wanneer deze gelijk zal zijn aan $\rho_{\max,FJ}^{(free)}$ zal er geen F->J overgang plaatsvinden, daar er al sprake is van synchronized flow.

Het zal nu duidelijk zijn dat er eerst een F->S overgang zal plaatsvinden alvorens er een wide moving jam ontstaat via de S->J overgang.

3.4 Verschillende patronen

Wanneer er een faseovergang heeft plaats gevonden kan dit leiden tot een bepaald verkeerspatroon. In de context van de drie-fasen theorie bestaan er twee hoofdpatronen: de 'synchronized flow pattern' (SP) behorende bij de synchronization flow en de 'general pattern' (GP) behorende bij beide congestie fasen van de drie-fasen theorie [10]. Daarnaast wordt er ook nog wel eens van een derde patroon gesproken, namelijk de 'expanded congested pattern' (EP).

3.4.1 Synchronized flow pattern

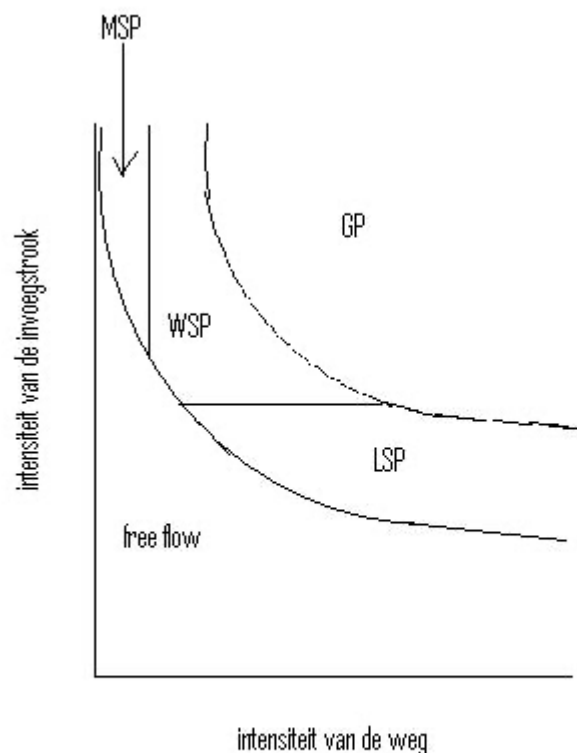
Een SP bestaat alleen uit de synchronized flow, maar valt nog wel onder te verdelen in drie verschillende typen van synchronized flow [5].

1. Een 'localized SP' (LSP) kan ontstaan bij een geïsoleerde bottleneck, hierbij is de breedte van de SP plaatselijk gelimiteerd in een bepaald tijdsinterval. Een LSP zal vooral ontstaan wanneer er sprake is van een lage intensiteit.
2. Bij een 'widening SP' (WSP) groeit de breedte van de SP continu met de tijd. Opmerkelijk bij een WSP is dat stroomopwaarts van een WSP de snelheid lager kan worden, terwijl de intensiteit niet hoger hoeft te worden.
3. Het laatste type SP staat bekend als een 'moving SP' (MSP) waarbij de SP zich als een gelokaliseerd patroon voortbeweegt over de weg.

3.4.2 General pattern

Een GP behoort bij zowel de synchronized flow als bij de wide moving jam. Dit komt doordat een GP zowel het gevolg van de F->S overgang omvat als het gevolg van de S->J overgang. In de synchronized flow, behorende bij een GP, zal er sprake zijn van het *pinch effect*. Hierdoor zal de gemiddelde snelheid in synchronized flow in een GP lager zijn dan de gemiddelde snelheid in synchronized flow in een SP.

De patronen behorende bij SP en GP zijn afgebeeld in figuur 16. Figuur 16 is gebaseerd op een gedeelte van een weg waartoe teven een invoegstrook behoort. Wanneer de intensiteit van de weg of van de invoegstrook toeneemt zal er eerder een GP ontstaan dan een SP.



Figuur 16: Verschillende congestiepatronen behorende bij de drie-fasen theorie.

3.4.3 Expanded congested pattern

Wanneer een GP dusdanig groot is dat het twee bottlenecks bedekt, dan is er sprake van een EP. Dit kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden doordat bij een bottleneck een WSP wordt gevormd, waardoor er dus sprake is van een synchronized flow (bedenk dat de kop van een synchronized flow vast ligt bij een bottleneck) die zich zover uitbreidt dat een tweede bottleneck stroomopwaarts wordt bereikt, waardoor er een EP ontstaat. Deze tweede bottleneck kan er de oorzaak van zijn dat er, stroomopwaarts van deze tweede bottleneck, er uiteindelijk ook wide moving jams gevormd worden.

3.5 Bottlenecks en capaciteit

Nu de verschillende fasen, de bijbehorende faseovergangen en de figuren behorende bij de drie-fasen theorie besproken zijn, kunnen nu de verkeersomstandigheden rond een bottleneck beschreven worden.

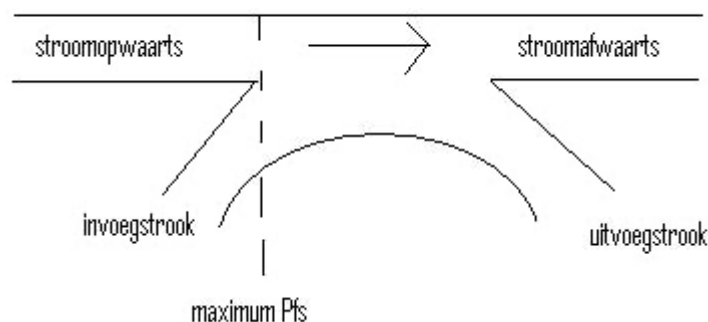
Aangezien een invoegstrook de meest bekende bottleneck is, zal hieronder uitgelegd worden hoe de twee vormen van congestie zich ontwikkelen rond een invoegstrook en wat voor gevolgen dat heeft voor de omgeving rond deze invoegstrook.

3.5.1 De kans op een F->S overgang bij een invoegstrook

Bij observaties van snelwegen is gebleken dat wanneer er een weggedeelte in beschouwing wordt genomen met een invoegstrook, de kans op een F->S overgang, P_{FS} , zijn maximum bereikt bij deze invoegstrook, dit wordt ook aangegeven in de volgende hypothese [5].

“The probability of the F->S transition, P_{FS} , (for a highway section length and for a time interval) depends on the highway location. This probability has a maximum at the bottleneck”.

Dat de kans op een F->S overgang zijn maximum bereikt bij een invoegstrook kan uitgelegd worden door een stuk weg in beschouwing te nemen waarbij er sprake is van een invoegstrook en een uitvoegstrook en waarbij de weg stroomopwaarts en stroomafwaarts van deze invoegstrook dezelfde omstandigheden heeft, zoals is afgebeeld in figuur 17.



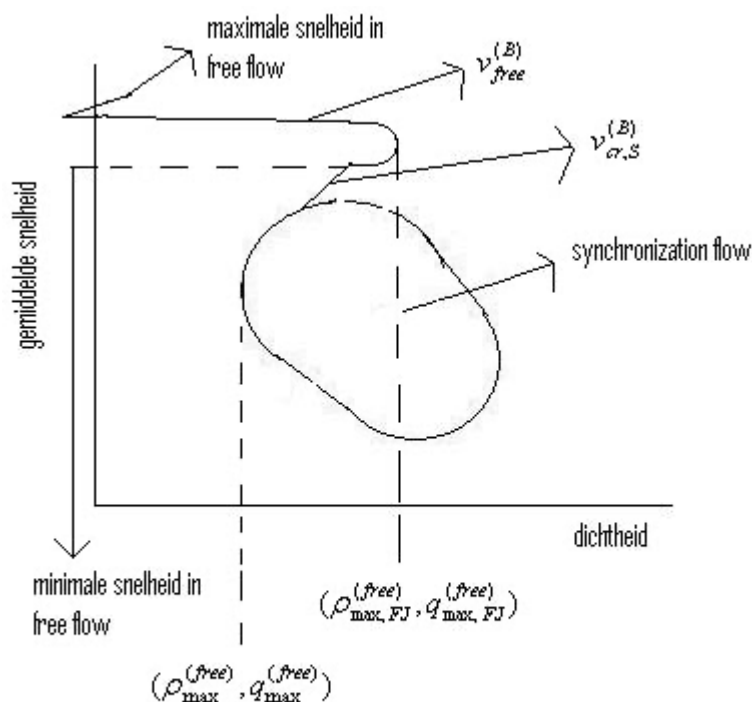
Figuur 17: Situatie bij invoegstrook.

Wanneer bestuurders een invoegstrook naderen zullen ze allen snelheid minderen, waardoor er gesproken kan worden van een deterministische verstoring. Deze verstoring zal permanent zijn en vast liggen bij de invoegstrook, hetgeen deze verstoring bewegingloos maakt. Door de aanwezigheid van de invoegstrook en de uitvoegstrook zal de intensiteit, genomen over het hele weggedeelte, niet afhankelijk zijn van de locatie van de weg daar de intensiteit overal hetzelfde zal zijn. Echter, de snelheid is dus wel lager bij de invoegstrook dan stroomopwaarts of stroomafwaarts het geval is. Hierdoor zal de dichtheid bij de invoegstrook hoger zijn dan bij de rest van het weggedeelte, waardoor de kans op een F->S overgang bij de invoegstrook zijn maximum bereikt.

Doordat de kans op een F->S overgang zijn maximum heeft bij een invoegstrook, zal logischerwijs ook het breakdown verschijnsel voornamelijk plaatsvinden bij deze invoegstroken.

3.5.2 Het breakdown verschijnsel bij een invoegstrook

Het breakdownverschijnsel in de drie-fasen theorie heeft een waarschijnlijkheidsachtergrond [5], [7]. Dit kan getoond worden door een Z-vorm, zie figuur 18, te construeren in het dichtheid snelheid figuur voor de verkeersomstandigheden rond een invoegstrook, waarbij aangenomen wordt dat de intensiteit op de invoegstrook constant is.



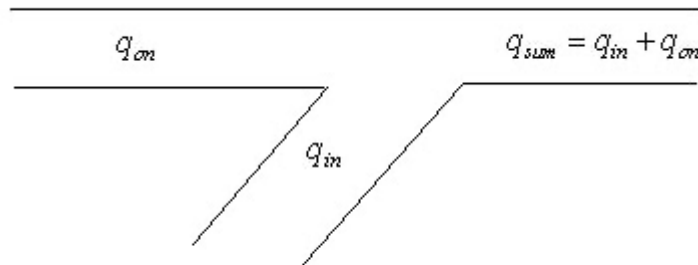
Figuur 18: Z-vorm voor bij een invoegstrook bij een F->S overgang, bron: [5].

Bij de invoegstrook doen zich twee verschillende soorten van intensiteit voor, de intensiteit op de invoegstrook, q_{on} , en de intensiteit op de weg zelf, stroomopwaarts van de invoegstrook, q_{in} [7].

De intensiteit stroomafwaarts van de invoegstrook zal daarom gelijk zijn aan

$$q_{sum} = q_{in} + q_{on}.$$

Voor de duidelijkheid zijn deze intensiteiten afgebeeld in figuur 19.



Figuur 19: Intensiteiten voor de weg, de invoegstrook en stroomafwaarts van de invoegstrook.

De kritieke grootte van een verstoring die nodig is voor een F->S overgang bij een invoegstrook zal hier genoteerd worden als $\Delta v_{cr,S}^{(B)}$ en kan berekend worden door

$$\Delta v_{cr,S}^{(B)} = v_{free}^{(B)} - v_{cr,S}^{(B)}.$$

Waarbij $v_{free}^{(B)}$ de snelheid is binnen de deterministische verstoring tijdens free flow bij de invoegstrook en $v_{cr,S}^{(B)}$ de snelheid is binnen de kritieke verstoring.

Het kritieke punt voor bij een invoegstrook zal hier aangegeven worden met $q_{cr,FS}^{(B)}$. Er geldt hier dus dat wanneer

$$q_{sum} = q_{cr,FS}^{(B)},$$

dat dan de grootte die nodig is voor de verstoring voor een F->S overgang, nul zal zijn, met als gevolg dat de kans op een F->S overgang bij de invoegstrook, $P_{FS}^{(B)}$, één zal zijn.

Wanneer $\Delta v_{cr,S}^{(B)}$ zal stijgen dan zal q_{on} dalen en daardoor zal ook q_{sum} dalen. Hierdoor zal dan ook de kans op een F->S overgang dalen. Het zal dus afhangen van de intensiteit q_{on} of er een F->S overgang bij de invoegstrook zal plaatsvinden die voor het breakdownverschijnsel zorgt [5].

3.5.3 De S->J overgang als gevolg van de invoegstrook

Wanneer er een F->S overgang heeft plaatsgevonden, is er dus sprake van een synchronization flow bij de invoegstrook. Deze synchronization flow kan vervolgens stroomopwaarts groeien en wanneer de snelheid hierin laag genoeg wordt kunnen er wide moving jams ontstaan door middel van de S->J overgang.

3.6 De drie-fasen theorie versus het fundamenteel diagram

Door de congestiefase in tweeën te splitsen heeft Kerner met zijn drie-fasen theorie, waarbij het verkeer in drie fasen gemodelleerd wordt, een nieuw zicht gegeven op het ontstaan van congestie, in vergelijking met modellen die gebruik maken van het fundamenteel diagram en waarbij het verkeer dus in twee fasen wordt gemodelleerd. De belangrijkste verschillen tussen deze twee benaderingen zullen hieronder kort worden samengevat [4], [5], [7], [8].

Het belangrijkste verschil is wel de presentatie van het dichtheid-intensiteit figuur van de beide benaderingen. Waar bij het fundamenteel diagram sprake is van een ééndimensionaal figuur waarin homogene en stationaire omstandigheden worden gepresenteerd, wordt er bij de drie-fasen theorie een tweedimensionale regio aangegeven waarin de verschillende congestie omstandigheden worden afgebeeld. Het verschil tussen beide benaderingen wordt zichtbaar waanneer empirische data geplot worden. In het fundamenteel diagram zullen deze punten zich niet exact op de lijnen bevinden, maar zullen de punten zich om deze lijnen verspreiden. De tweedimensionale regio van de drie-fasen theorie zal echter nauwelijks veranderen door het gebruik van de empirische data.

Ten tweede wordt bij de benadering met het fundamenteel diagram aangenomen dat wanneer de dichtheid maar groot genoeg is, dus wanneer het kritieke punt $(\rho_{\max}^{(free)}, q_{\max}^{(free)})$ wordt bereikt, er moving jams in de verkeerstroam zullen ontstaan.

Bij de drie-fasen theorie is er sprake van een waarschijnlijkheidsachtergrond. De kans op een faseovergang zal stijgen naarmate de dichtheid stijgt.

Bovendien zal er bij een fundamenteel diagram benadering slechts sprake zijn van het ontstaan van een moving jam, terwijl zich bij de drie-fasen theorie ook alleen een vorm van synchronized flow kan voordoen, waarin niet perse wide moving jams hoeven te ontstaan.

Een derde verschil is dat modellen die gebruik maken van het fundamenteel diagram ervan uitgaan dat voertuigen die achter elkaar rijden een ruimte tussen die voertuigen zullen houden zoals de veiligheidsafstand van dat model definieert. Bij de drie-fasen theorie wordt er echter gebruik gemaakt van een variabele afstand D . Dat wil zeggen dat er bij deze theorie er vanuit wordt gegaan dat bestuurders hun snelheid zullen aanpassen, maar er niets om geven wat de exacte afstand is tot het volgende voertuig, zolang de afstand maar niet nul is. Hierdoor verdwijnt de unieke evenwichtsrelatie tussen de dichtheid en de intensiteit.

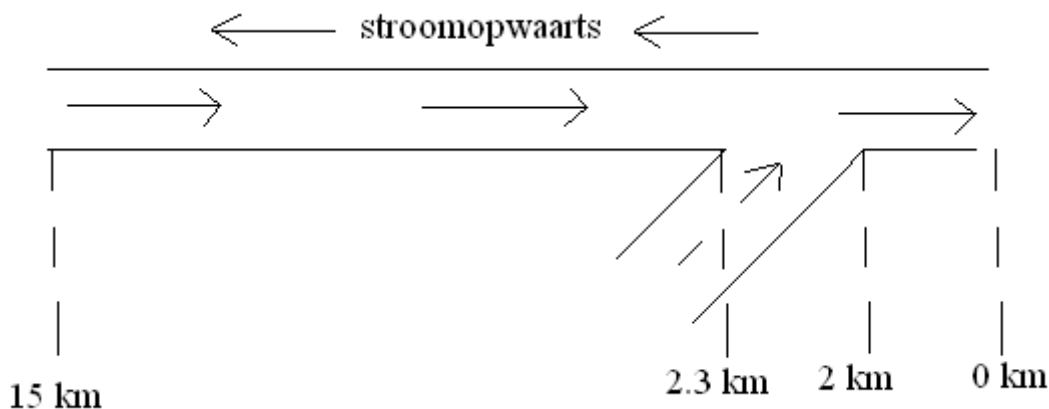
4. Het simulatieprogramma

Om een verdere vergelijking te kunnen maken tussen het modelleren van het verkeer in twee fasen en het modelleren van het verkeer in drie fasen is er een simulatieprogramma in Matlab 6.5 ontwikkeld. De resultaten die het simulatieprogramma zullen met name voor een tweetal punten gebruikt worden. Ten eerste zal er bekeken worden of er verschillende patronen ontstaan bij de beide methoden. Ten tweede zal het intensiteit dichtheid figuur van beide benaderingen bestudeerd worden om zo er achter te kunnen komen of er eerder sprake zal zijn van een unieke evenwichtsrelatie (behorende bij het modelleren in twee fasen) of van een tweedimensionale regio (behorende bij het modelleren in drie fasen).

Hieronder zal begonnen worden met een beschrijving van dit simulatieprogramma, hoe deze is opgebouwd en hoe de locaties en snelheden van de voertuigen bepaald zijn. Vervolgens zal de beschrijving van dit programma als wiskundig model gepresenteerd worden. Tot slot zullen de resultaten worden getoond voor verschillende omstandigheden op de weg.

4.1 Het programma

In het simulatieprogramma wordt er een éénbaansweg gesimuleerd van 15 km gedurende 90 minuten. Als bottleneck is gekozen voor een invoegstrook over een lengte van 300 meter, startend vanaf 2 km stroomopwaarts van de weg, zoals is afgebeeld in figuur 20.



Figuur 20: Weg en invoegstrook zoals deze door het simulatieprogramma wordt gebruikt.

Op tijdstip $t = 0$ wordt begonnen met 100 voertuigen die allen 100 km/uur rijden en gelijk over de weg verdeeld zijn. Vervolgens wordt na iedere minuut, t_i , de nieuwe toestand op de weg bepaald, t_{i+1} . Deze nieuwe toestand wordt verkregen door eerst de nieuwe locatie van het voertuig dat voorop rijdt te bepalen op basis van de snelheid van dit voertuig. Voor het tweede voertuig wordt dan bepaald welke afstand deze wil houden van het eerste voertuig, de veiligheidsafstand, waardoor de nieuwe snelheid van dit tweede voertuig berekend kan worden waarmee vervolgens de nieuwe locatie bekend gemaakt kan worden. De nieuwe snelheid wordt bepaald op basis van de veiligheidsafstand doordat hierdoor bekeken kan worden of het tweede voertuig zal optrekken, remmen of dezelfde snelheid behoudt. Het proces van de bepaling van de nieuwe snelheid en locatie voor het tweede voertuig herhaalt zich vervolgens voor het derde voertuig en gaat net zolang door totdat voor alle voertuigen die

op t_i op de weg waren tot aan de 2km grens van de weg, de nieuwe locatie en snelheid bepaald zijn voor t_{i+1} .

Zoals eerder vermeld begint 2 km stroomopwaarts van de weg de invoegstrook. Voor het gedeelte van de weg waar deze invoegstrook zich bevindt, wordt de nieuwe situatie van de weg én van de invoegstrook per seconde binnen een minuut bekeken, daar er op dit gedeelte veel kan veranderen in weinig tijd.

Op $t = 0$ bevinden zich twee voertuigen op de invoegstrook die kunnen worden ingevoegd. Of deze voertuigen ook daadwerkelijk worden toegevoegd aan de weg hangt af van de locatie op de invoegstrook waar de voertuigen zich bevinden en van de afstand van de voertuigen op de weg waartussen het invoegende voertuig bij invoegen terecht zou komen.

Na iedere seconde wordt de invoegstrook weer aangevuld met nieuwe voertuigen waarbij het aantal nieuwe voertuigen afhankelijk is van de gebruiker van het simulatieprogramma.

Nadat de nodige voertuigen zijn ingevoegd gedurende één minuut, worden locaties en de snelheden van de voertuigen die zich stroomopwaarts van de invoegstrook bevinden, op dezelfde manier bepaald als voor het tweede voertuig hierboven beschreven is.

Wanneer nu alle voertuigen hun nieuwe locatie en snelheid hebben verkregen voor t_{i+1} , wordt de weg aangevuld met nieuwe voertuigen waarbij het aantal, net als bij de invoegstrook, door de gebruiker wordt bepaald.

Om het verschil te kunnen maken tussen de aanpak volgens de theorie behorende bij het fundamenteel diagram en de drie-fasen theorie, wordt de veiligheidsafstand op twee verschillende manieren bepaald.

Voor de aanpak volgens de theorie behorende bij het fundamenteel diagram, is gebruik gemaakt van een veiligheidsafstand die gerelateerd is aan de snelheden. Zo is deze afstand bijvoorbeeld 5 meter wanneer de snelheid tussen 10 km/uur en 20 km/uur ligt, en 40 meter voor een snelheid tussen de 90 km/uur en 100 km/uur.

Voor de drie-fasen theorie wordt er van een variabele veiligheidsafstand gebruik gemaakt. Dat wil zeggen dat wanneer de voertuigen hier tussen de 10 km/uur en 20 km/uur rijden, de veiligheidsafstand kan variëren tussen de 0.5 en 11 meter. En bij snelheden tussen de 90 km/uur en 100 km/uur deze afstand kan variëren van 30 tot aan 50 meter.

4.2 Wiskundig model

Alvorens de gebruikte formules te definiëren zoals deze in het simulatieprogramma worden gebruikt, volgt hier eerst een tabel van de gebruikte symbolen, de betekenis daarvan en de bijbehorende eenheid of waarde wanneer één van deze twee van toepassing is.

Symbol	Betekenis	Eenheid of waarde
Nl_1	locatie voorste voertuig op t_{i+1}	meter
$Nlj-1$	locatie voertuig j-1 op t_{i+1} (voorganger)	meter
Nl_j	locatie voertuig j op t_{i+1}	meter
Vl_1	locatie voorste voertuig op t_i	meter

V _{j-1}	locatie voertuig j-1 op t _i (voorganger)	meter
V _j	locatie voertuig j op t _i	meter
S ₁	snelheid voorste voertuig op t _i	km/uur
S _{j-1}	snelheid voertuig j-1 (voorganger)	km/uur
S _j	snelheid voertuig j	km/uur
voorganger	het voertuig dat voor het voertuig rijdt waarvoor een berekening wordt gedaan	meter
vorigeLocatie	de locatie van een voertuig op t _i	meter
remFactor	in welke mate een voertuig zal remmen	Waarde: 0.9 of 1 of 1.1
optrekFactor	in welke mate een voertuig zal optrekken	Waarde: 0.9 of 1 of 1.1
remSnelheid	de snelheid die een voertuig heeft na een actie van remmen	km/uur
optrekSnelheid	de snelheid die een voertuig heeft na een actie van optrekken	km/uur
MaxAfTeLeggenWeg	het maximaal aantal kilometer dat een voertuig gedurende een minuut mag afleggen	km
F _{dyn}	geeft een lichte variatie bij aanpassing van de snelheid bij het remmen	Waarde: 0 of 0.9
F _r	geeft ook een lichte variatie bij aanpassing van de snelheid bij het remmen	Waarde: 0 of 0.2
C _{dyn}	geeft een lichte variatie bij aanpassing van de snelheid bij het optrekken	Waarde: 0 of 0.9
C _r	geeft ook een lichte variatie bij aanpassing van de snelheid bij het optrekken	Waarde: 0 of 0.2
d	afstand	meter
P ₁	eerste kans behorende bij het invoegen van een voertuig	Waarde: 0.2 of 0.9
P ₂	tweede kans behorende bij het invoegen van	Waarde: 0.4 of 0.9

	een voertuig	
P_3	derde kans behorende bij het invoegen van een voertuig	Waarde: 0.6 of 0.9
$K_{grootte}$	geeft aan of het zeer waarschijnlijk is dat een voertuig zal invoegen of niet	Waarde: klein of groot
α	constante	Waarde: 0.9
β	constante	Waarde: 0.9
A_0	constante	Waarde: 1
B_0	constante	Waarde: 1
P_a	constante	Waarde: 0.2
P_b	constante	Waarde: 0.2
M_0	constante	Waarde: 0.5
M_1	constante	Waarde: 0.5

Tabel 1: uitleg symbolen.

Zoals eerder vermeld wordt na iedere minuut de nieuwe locaties van de voertuigen berekend en de daarbij behorende nieuwe verkeersomstandigheden.

De locatie voor t_{i+1} van het voorste voertuig wordt bepaald op basis van zijn snelheid op t_i :

$$Nl_1 = Vl_1 - (Sl_1/60).$$

In tabel 2 en tabel 3 zijn de veiligheidsafstanden te vinden zoals deze worden gebruikt voor respectievelijk het modelleren van het verkeer in twee fasen en het modelleren van het verkeer in drie fasen.

Snelheid	Veiligheidsafstand
$0 \leq Sl_j < 1$	0
$1 \leq Sl_j \leq 10$	12.5
$10 < Sl_j \leq 20$	17.5
$20 < Sl_j \leq 30$	22.5
$30 < Sl_j \leq 40$	25
$40 < Sl_j \leq 50$	27.5
$50 < Sl_j \leq 60$	30
$60 < Sl_j \leq 70$	35
$70 < Sl_j \leq 80$	37.5
$80 < Sl_j \leq 90$	42.5
$90 < Sl_j \leq 100$	47.5

Tabel 2: Veiligheidsafstanden behorende bij het modelleren van het verkeer in twee fasen.

Gemiddelde snelheid	Veiligheidsafstand
$0 \leq S_{l_j} < 1$	0
$1 \leq S_{l_j} \leq 10$	[7.5, 17.5]
$10 < S_{l_j} \leq 20$	[12.5, 22.5]
$20 < S_{l_j} \leq 30$	[17.5, 27.5]
$30 < S_{l_j} \leq 40$	[20, 30]
$40 < S_{l_j} \leq 50$	[22.5, 32.5]
$50 < S_{l_j} \leq 60$	[22.5, 37.5]
$60 < S_{l_j} \leq 70$	[27.5, 42.5]
$70 < S_{l_j} \leq 80$	[27.5, 47.5]
$80 < S_{l_j} \leq 90$	[32.5, 52.5]
$90 < S_{l_j} \leq 100$	[37.5, 57.5]

Tabel 3: Veiligheidsafstanden behorende bij het modelleren van het verkeer in drie fasen.

De veiligheidsafstanden zoals deze gepresenteerd staan in tabel 3, geven het interval aan waartussen de veiligheidsafstand zal liggen bij de bijbehorende snelheid van een voertuig. De daadwerkelijk gebruikte veiligheidsafstand is een stochastische variabele.

Wanneer de veiligheidsafstand bepaald is, kan er bekeken worden of dezelfde snelheid behouden kan blijven worden of dat er opgetrokken of geremd dient te worden. Dit betekent dat wanneer op basis van de snelheid op t_i een voertuig exact die veiligheidsafstand bereikt op t_{i+1} zoals deze bepaald is, de huidige snelheid aangehouden kan worden. Wanneer de veiligheidsafstand overschreden zal worden met de snelheid van t_i , dient er geremd te worden. In hoeverre een voertuig afremt, wordt bepaald door onderstaande formules waarbij gebruik gemaakt wordt van een remfactor zodat niet alle voertuigen exact hetzelfde zullen reageren.

$$F_{\text{dyn}} = \begin{cases} \beta & \text{als } R_1 < M_1 \\ 0 & \text{als } R_1 \geq M_1 \end{cases},$$

$$F_r = \begin{cases} P_b & \text{als } R_2 < P_b \\ 0 & \text{als } R_2 \geq P_b \end{cases},$$

$$\text{remFactor} = \max(F_{\text{dyn}} + F_r, B_0).$$

De remFactor stelt nu een getal voor die uiteindelijk mede bepaald wat de snelheid van het voertuig op t_{i+1} zal zijn. Deze factor wordt meegenomen omdat er bij deze simulatie er niet vanuit wordt gegaan dat alle bestuurders op dezelfde manier (dus met dezelfde kracht en op het zelfde tijdstip) remmen. Deze remFactor zorgt nu voor enige variatie in het remgedrag. Voordat de snelheid berekend kan worden die een voertuig heeft na het moment van remmen, zal eerst moeten worden bepaald wat de maximaal af te leggen weg is dat het voertuig mag rijden alvorens de veiligheidsafstand tot de voorganger is bereikt.

$$\text{maxAfTeLeggenWeg} = (V_{l_j} - (N_{l_{j-1}} + \text{veiligheidsAfstand})).$$

$$\text{remSnelheid} = \text{remFactor} * (\text{maxAfTeLeggenWeg}/1.1).$$

Wanneer op basis van de snelheid van t_i de afstand groter zal zijn dan de bepaalde veiligheidsafstand, dient er opgetrokken te worden. Dit gebeurt op ongeveer dezelfde manier als het afremmen:

$$C_{\text{dyn}} = \begin{cases} \alpha & \text{als } R_1 < M_0 \\ 0 & \text{als } R_1 \geq M_0 \end{cases},$$

$$C_r = \begin{cases} P_a & \text{als } R_2 < P_a \\ 0 & \text{als } R_2 \geq P_a \end{cases},$$

$$\text{optrekFactor} = \max(C_{\text{dyn}} + C_r, A_0).$$

$$\text{maxAfTeLeggenWeg} = (V_{l_j} - (N_{l_{j-1}} + \text{veiligheidsAfstand})).$$

$$\text{optrekSnelheid} = \text{optrekFactor} * (\text{maxAfTeLeggenWeg}/1.1).$$

Wanneer de nieuwe snelheid van een voertuig bekend is, kan daar dan vervolgens de locatie voor t_{i+1} bepaald worden:

$$N_{l_j} = V_{l_j} - (S_{l_j}/60).$$

Voor de invoegende voertuigen wordt er eerst bekeken tussen welke twee voertuigen deze terecht zou kunnen komen op de weg. Dit zijn respectievelijk de voertuigen die zich zowel vlak voor de locatie van het invoegende voertuig bevindt en de locatie vlak daarachter. Vervolgens wordt de afstand tussen de twee voertuigen op de weg berekend:

$$d = V_{l_j} - V_{l_{j-1}}.$$

Op basis van deze afstand en op basis van de locatie van het invoegende voertuig wordt er een kans bepaald of het voertuig wel of niet zal invoegen:

$$K_{\text{grootte}} = \begin{cases} \textit{klein} & \text{als } d < 0.3 * S_{j-1} + 15 \\ \textit{groot} & \text{als } d \geq 0.3 * S_{j-1} + 15 \end{cases},$$

$$P_1 = \begin{cases} 0.2 & \text{als } K_{\text{grootte}} = \textit{klein} \\ 0.9 & \text{als } K_{\text{grootte}} = \textit{groot} \end{cases},$$

$$P_2 = \begin{cases} 0.4 & \text{als } K_{\text{grootte}} = \textit{klein} \\ 0.9 & \text{als } K_{\text{grootte}} = \textit{groot} \end{cases},$$

$$P_3 = \begin{cases} 0.6 & \text{als } K_{\text{grootte}} = \textit{klein} \\ 0.9 & \text{als } K_{\text{grootte}} = \textit{groot} \end{cases},$$

waarbij P_1 behoort tot de locatie 2250 tot 2300 meter stroomopwaarts, P_2 tot de locatie 2150 tot 2250 meter stroomopwaarts en P_3 tot de locatie 2050 tot 2150 meter stroomopwaarts. Mocht een invoegend voertuig zich op de locatie 2000 tot 2050 meter bevinden, dan zal het voertuig met kans = 1 invoegen. De snelheid die het invoegende voertuig verkrijgt, is gelijk aan de snelheid van zijn voorganger op de weg.

4.3 De resultaten

De gebruiker kan aangeven hoeveel voertuigen er per uur aan de weg en invoegstrook toegevoegd dienen te worden. Het simulatieprogramma is voor verschillende van deze aantallen gedraaid die hieronder in tabel 4 zijn weergegeven.

	Aantal toe te voegen voertuigen aan de weg per uur	Aantal toe te voegen voertuigen aan de invoegstrook per uur
Case 1	400	400
Case 2	400	2500
Case 3	1000	1000
Case 4	1000	800
Case 5	1000	2200
Case 6	1600	1000
Case 7	1600	2000
Case 8	2500	400
Case 9	2500	1800
Case 10	5000	2500

Tabel 4: Aantallen toe te voegen voertuigen zoals gebruikt met het simulatieprogramma.

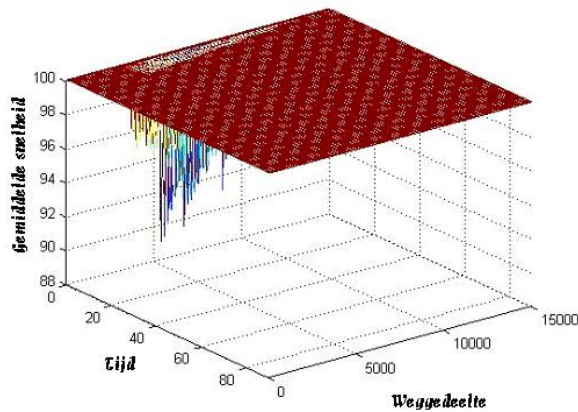
Van de combinaties van het aantal voertuigen dat per uur wordt toegevoegd aan de weg en de invoegstrook zijn de resultaten hieronder te vinden, waarbij alle genoemde combinaties zoals deze in tabel 1 vermeld staan worden aangeduid met case 1 tot en met case 10.

Per situatie (dus per combinatie van het aantal voertuigen dat wordt toegevoegd aan de weg en aan de invoegstrook) is het simulatieprogramma vijf keer gedraaid om een zo realistisch mogelijk beeld te verkrijgen, waarbij bij iedere run de intensiteit, de dichtheid en de snelheid per 100 meter van de weg als output worden gegeven. De 3D grafieken die getoond zullen worden zijn het resultaat van een enkele run zowel voor de resultaten behorend bij de theorie van het fundamenteel diagram als de resultaten behorend bij de drie-fasen theorie. Hierbij geeft de x-as de locatie van de weg weer, de y-as de tijd en de z-as de gemiddelde snelheid. De verschillende kleuren hierin geven de gemiddelde snelheden waarbij bruin staat voor 100 km/uur en donkerblauw voor bijna 0 km/uur. De 2D grafieken geven een totaal beeld weer van de vijf runs voor de dichtheid (x-as) en de intensiteit (y-as). De blauwe cirkels tonen daarbij alle resultaten zoals deze verkregen zijn volgens de drie-fasen theorie (met de variabele veiligheidsafstand) en de rode lijn zijn de gemiddelde resultaten behaald volgens de theorie behorende bij het fundamenteel diagram (geen variabele veiligheidsafstand). Echter zal een aantal van deze 2D grafieken en paar waarden geven waarbij een zeer lage intensiteit getoond wordt, terwijl de overige waarden bij hogere intensiteiten behoren. Die paar lage

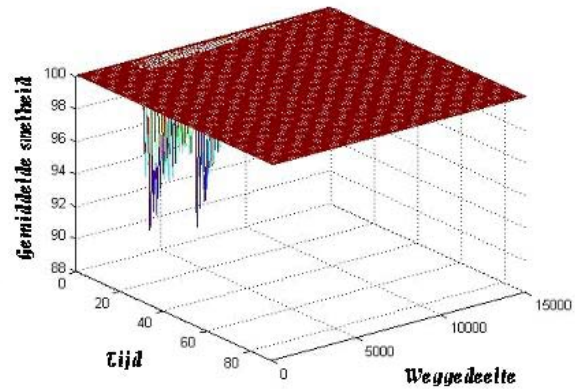
waarden zijn het resultaat van de begininstellingen en vertonen daardoor niet het resultaat dat voortkomt uit een congestievorm.

4.3.1 Case 1

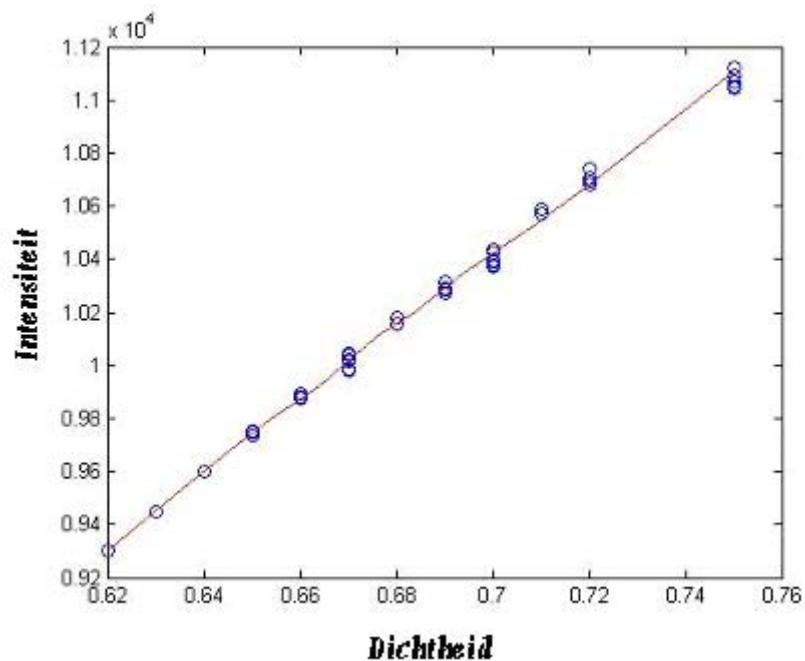
In deze situatie zullen er zowel op de weg als op de invoegstrook 400 voertuigen per uur worden toegevoegd.



Figuur 21: Resultaten voor fundamenteel diagram.



Figuur 22: Resultaten voor drie-fasen theorie.

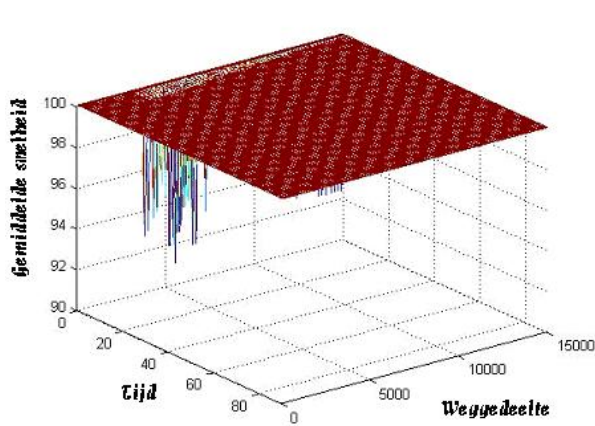


Figuur 23: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

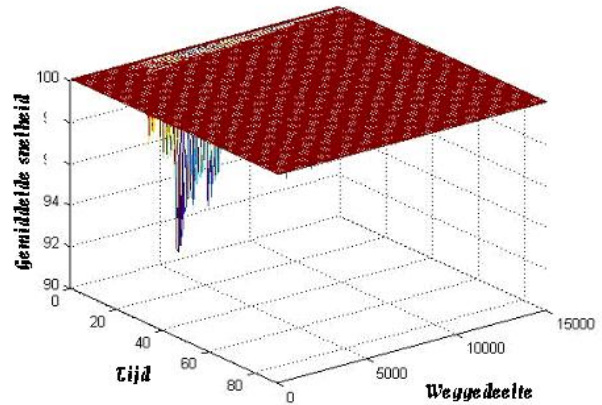
Daar de aantallen voertuigen die toegevoegd zullen worden aan de weg en aan de invoegstrook vrij laag zijn, is er in de figuren 9 en 10 weinig congestie waar te nemen.

4.3.2 Case 2

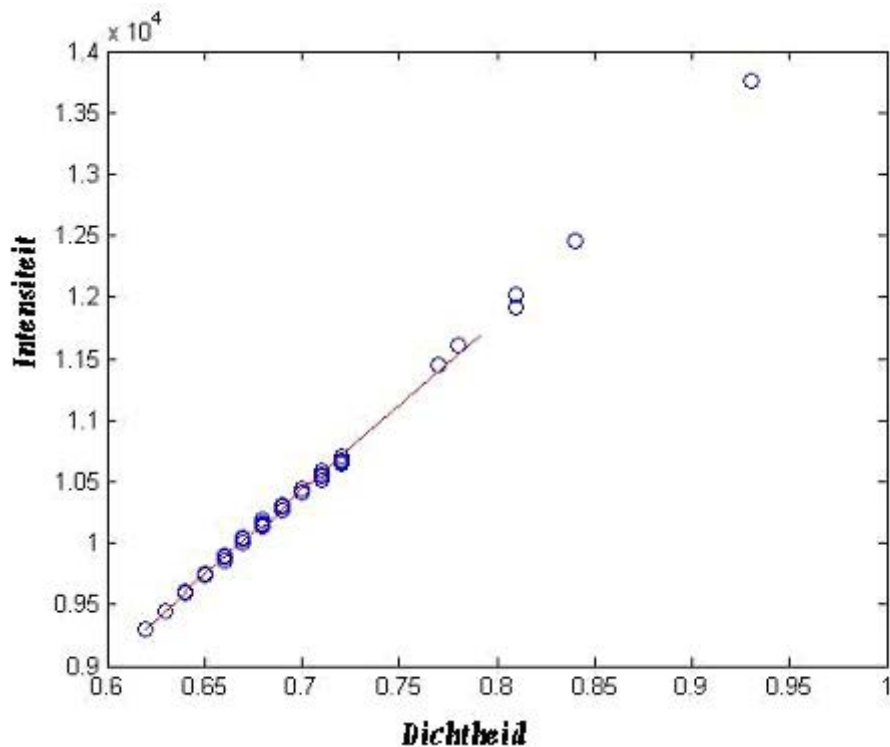
In deze situatie zullen er per uur 400 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 2500 aan de invoegstrook.



Figuur 24: Resultaten voor fundamenteel diagram.



Figuur 25: Resultaten voor drie-fasen theorie.

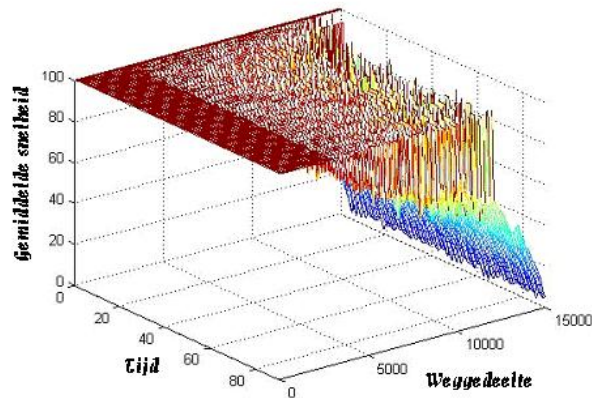


Figuur 26: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

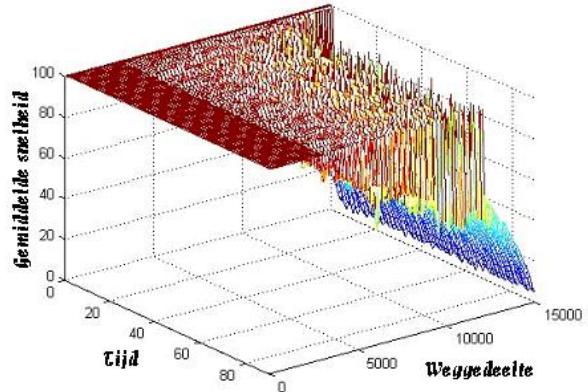
De gemiddelde snelheid lijkt door het hoge aantal voertuigen dat per uur wordt toegevoegd aan de invoegstrook niet veel te dalen. Echter wordt er wel een hoge dichtheid en een hoge intensiteit genoteerd in vergelijking met case 1.

4.3.3 Case 3

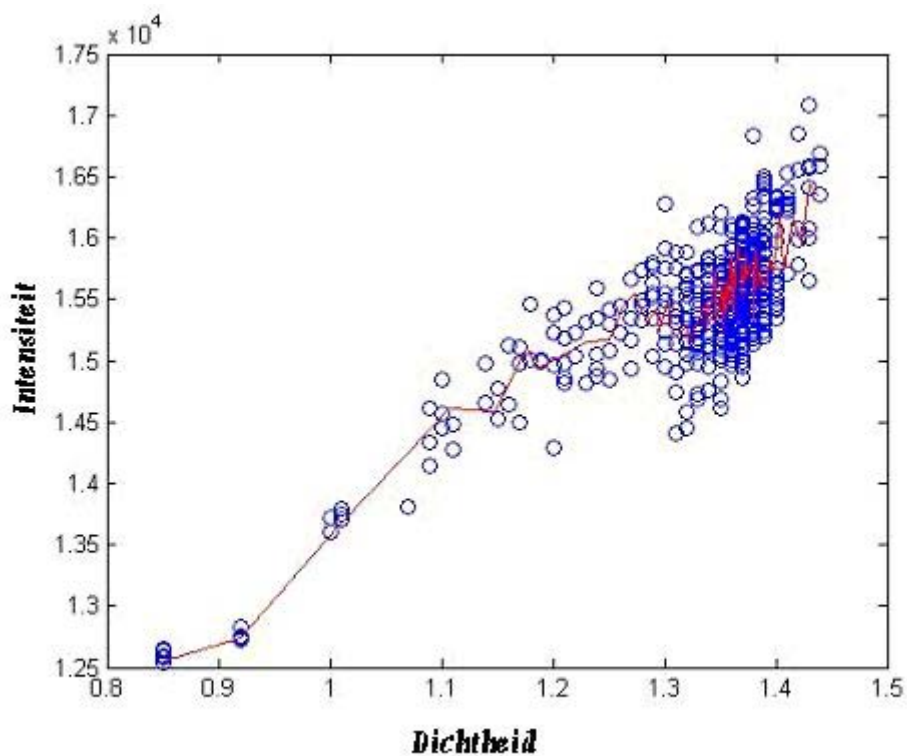
In deze situatie zullen er per uur 1000 voertuigen worden toegevoegd zowel aan de weg als aan de invoegstrook.



Figuur 27: Resultaten voor fundamenteel diagram.



Figuur 28: Resultaten voor drie-fasen theorie.

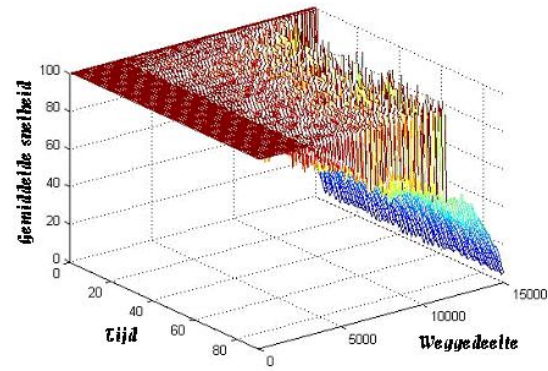
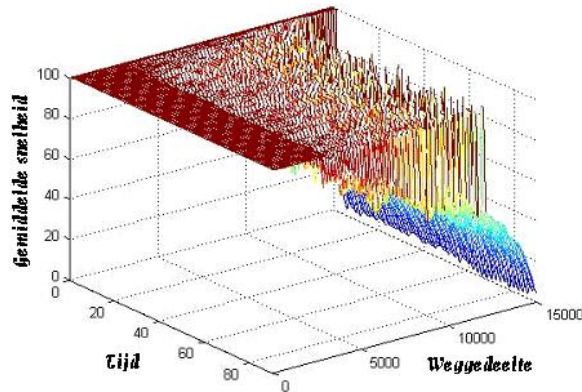


Figuur 29: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Het verhogen van het aantal toe te voegen voertuigen op de weg heeft een duidelijke verlaging van de gemiddelde snelheid tot gevolg. Ook stijgen de intensiteit en de dichtheid aanzienlijk.

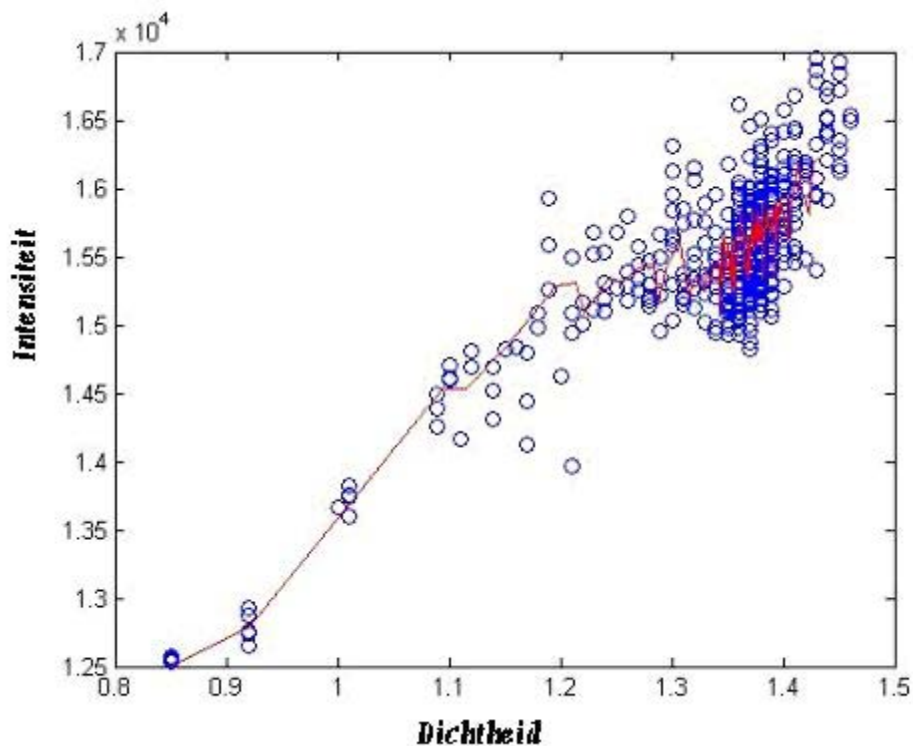
4.3.4 Case 4

In deze situatie zullen er per uur 1000 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 800 aan de invoegstrook.



Figuur 30: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 31: Resultaten voor drie-fasen theorie.

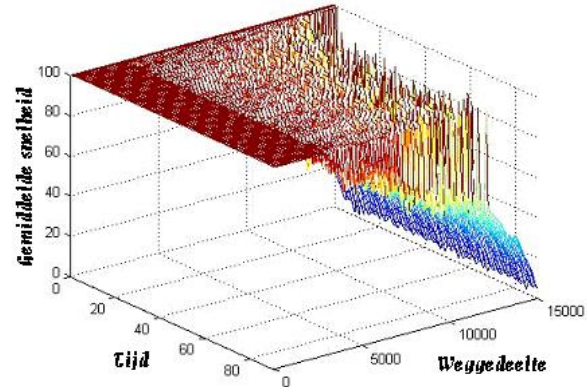
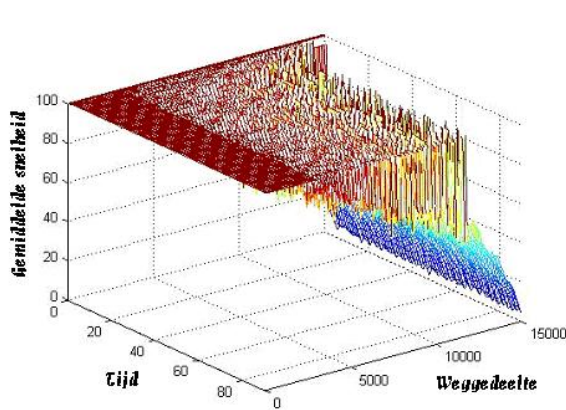


Figuur 32: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

De resultaten van deze case verschillen nauwelijks met de resultaten van case 3, wat ook vrij logisch is aangezien de aantallen van de toe te voegen voertuigen bijna hetzelfde zijn.

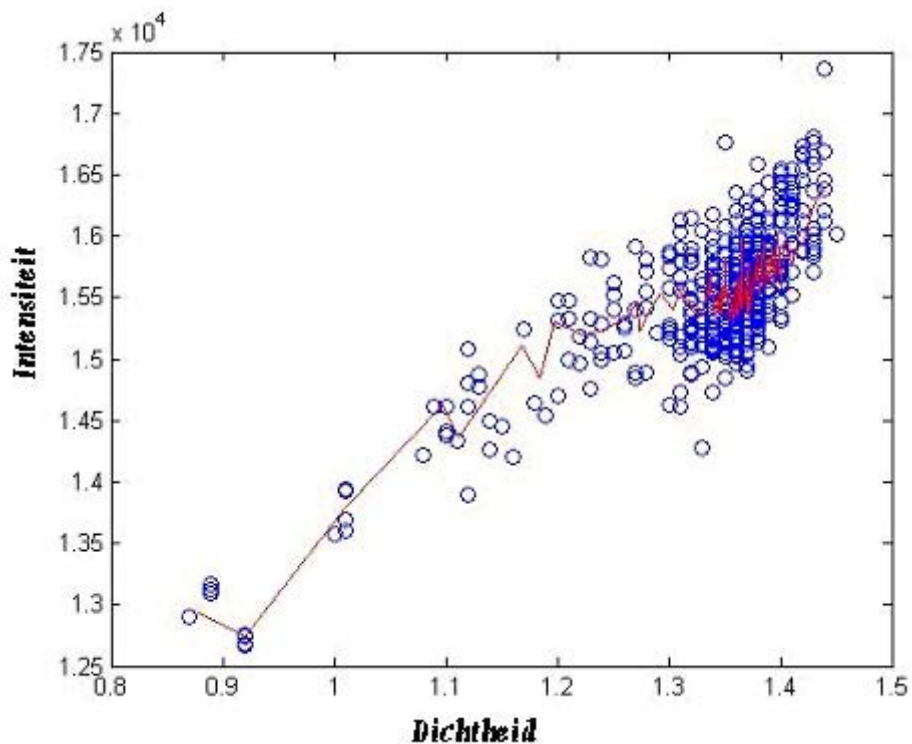
4.3.5 Case 5

In deze situatie zullen er per uur 1000 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 2200 aan de invoegstrook.



Figuur 33: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 34: Resultaten voor drie-fasen theorie.

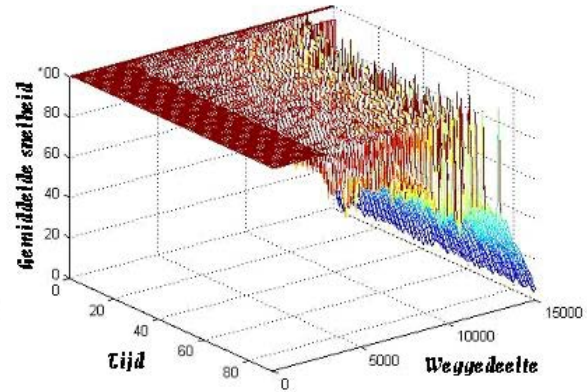
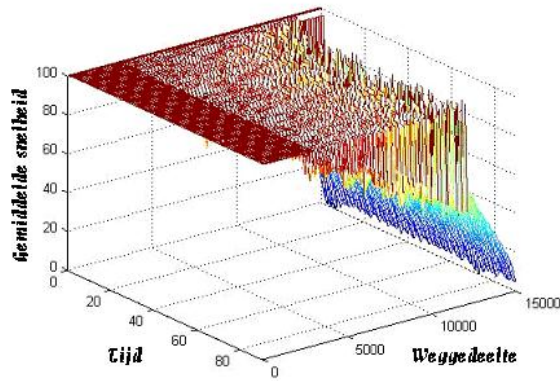


Figuur 35: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Door het verhogen van het aantal toe te voegen voertuigen op de invoegstrook ten opzichte van case 4, heeft hier duidelijk tot gevolg dat de gemiddelde snelheid hier eerder in de tijd al meer daalt.

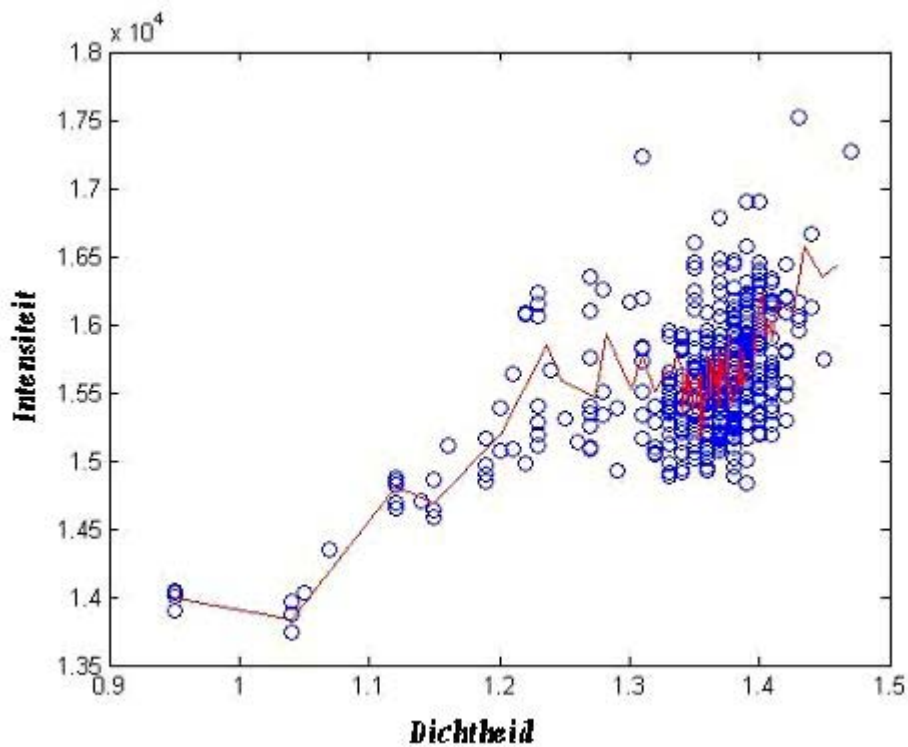
4.3.6 Case 6

In deze situatie zullen er per uur 1600 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 1000 aan de invoegstrook.



Figuur 36: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 37: Resultaten voor drie-fasen theorie.

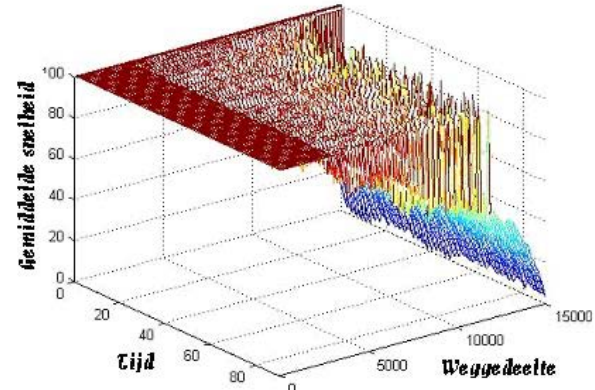
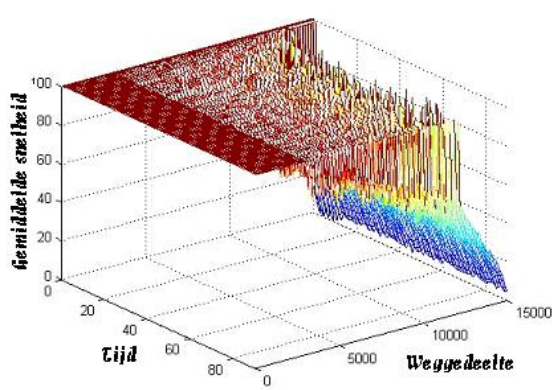


Figuur 38: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Het verhogen van het aantal toe te voegen voertuigen op de weg leidt hier tot een verhoging van de intensiteit.

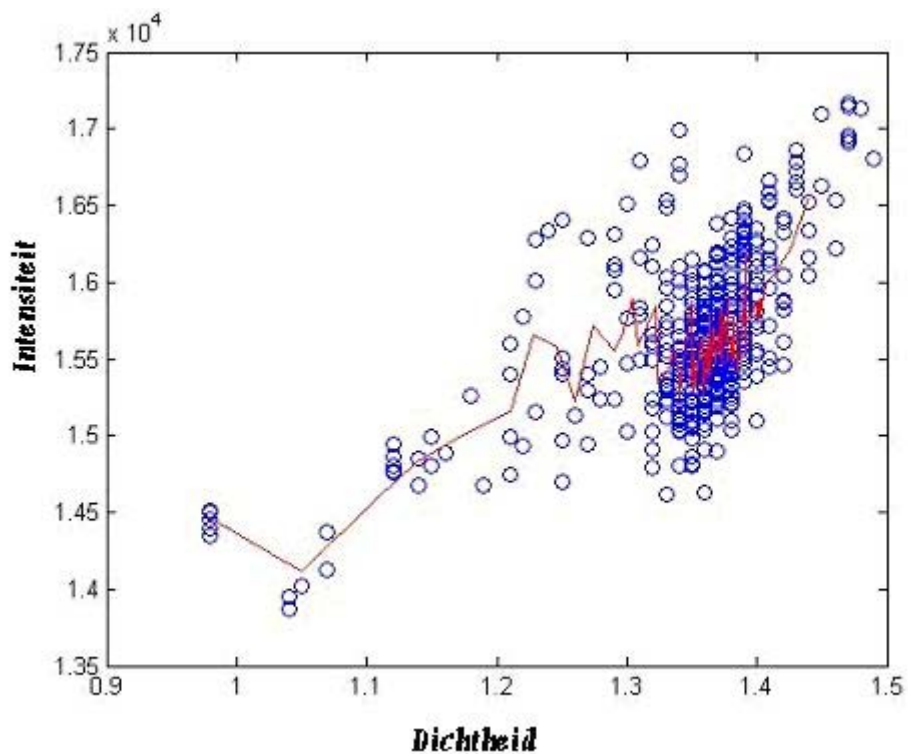
4.3.7 Case 7

In deze situatie zullen er per uur 1600 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 2000 aan de invoegstrook.



Figuur 39: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 40: Resultaten voor drie-fasen theorie.

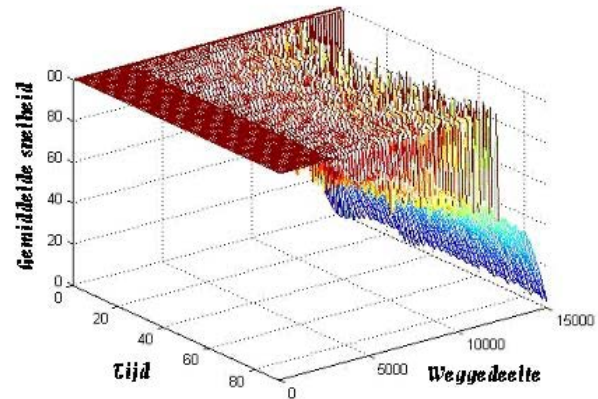
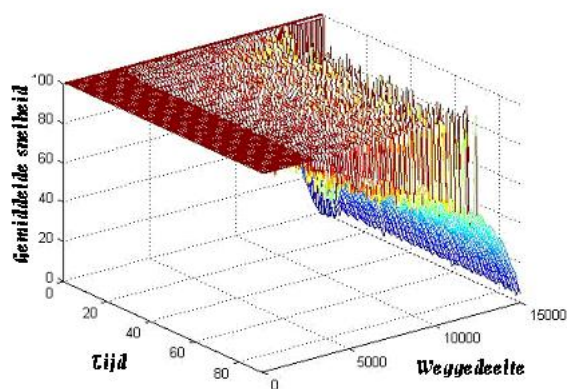


Figuur 41: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Net als bij case 5 heeft een verhoging van het aantal toe te voegen voertuigen op de invoegstrook een verlaging van de gemiddelde snelheid eerder in de tijd tot gevolg.

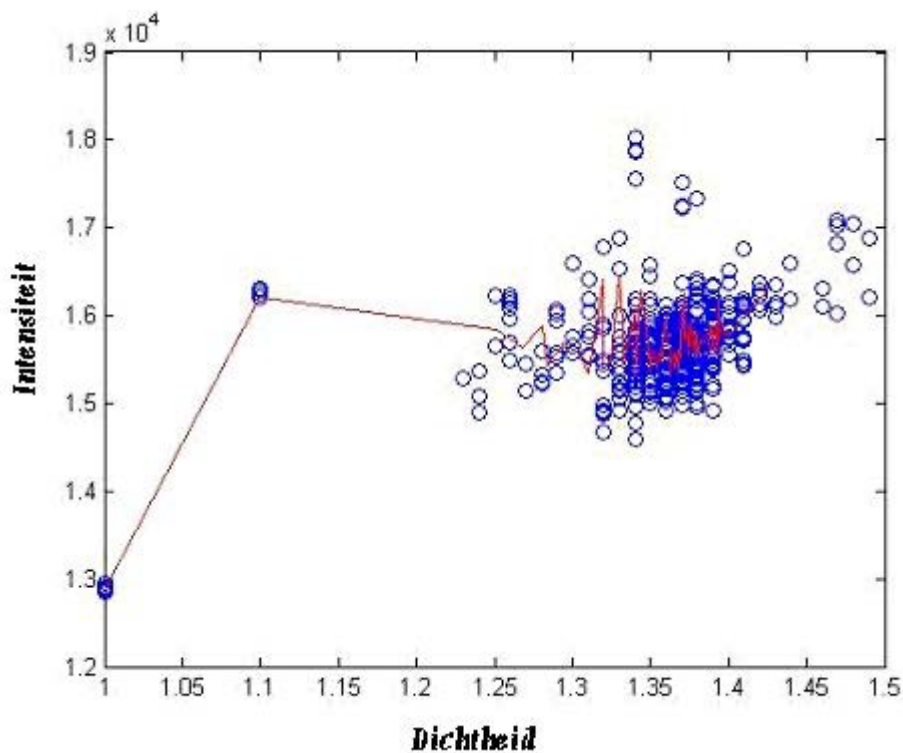
4.3.8 Case 8

In deze situatie zullen er per uur 2500 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 400 aan de invoegstrook.



Figuur 42: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 43: Resultaten voor drie-fasen theorie.

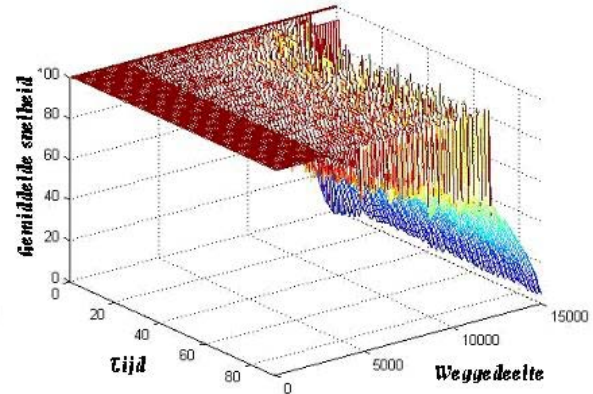
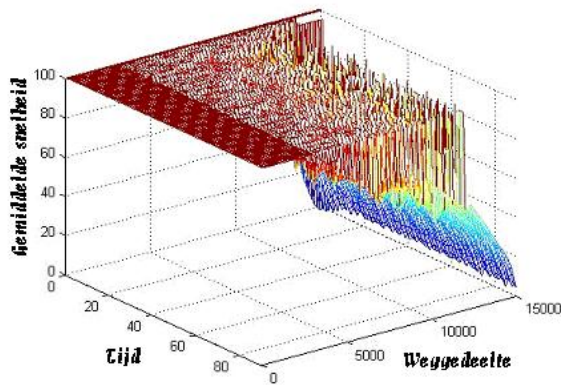


Figuur 44: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Bij dit hoge aantal toe te voegen voertuigen op de weg, is er bijna alleen nog maar sprake van een hoge intensiteit en een hoge dichtheid.

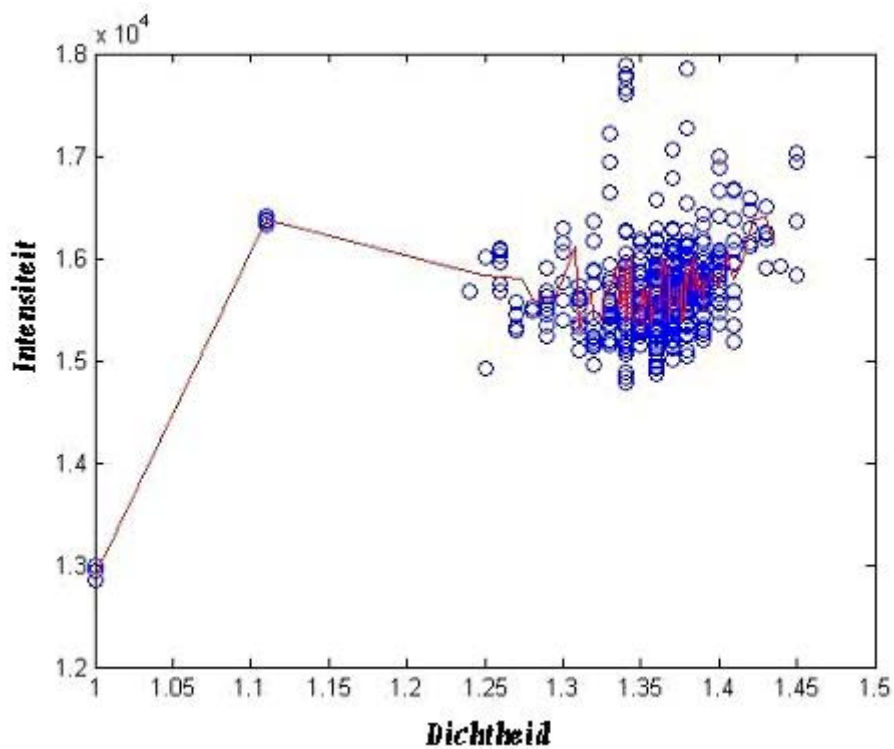
4.3.9 Case 9

In deze situatie zullen er per uur 2500 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 1800 aan de invoegstrook.



Figuur 45: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 46: Resultaten voor drie-fasen theorie.

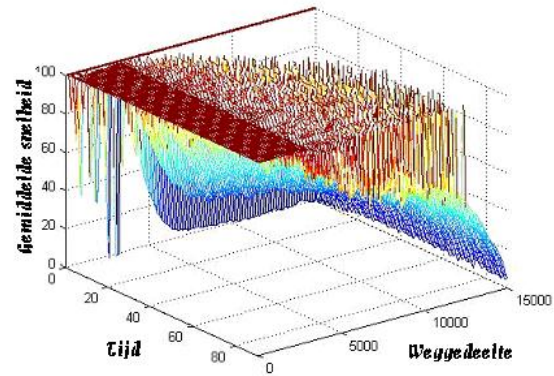
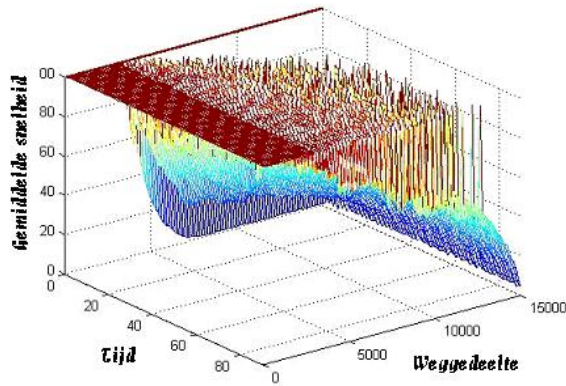


Figuur 47: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Hier leidt het verhogen van het aantal toe te voegen voertuigen op invoegstrook tot een scherpere daling van de gemiddelde snelheid.

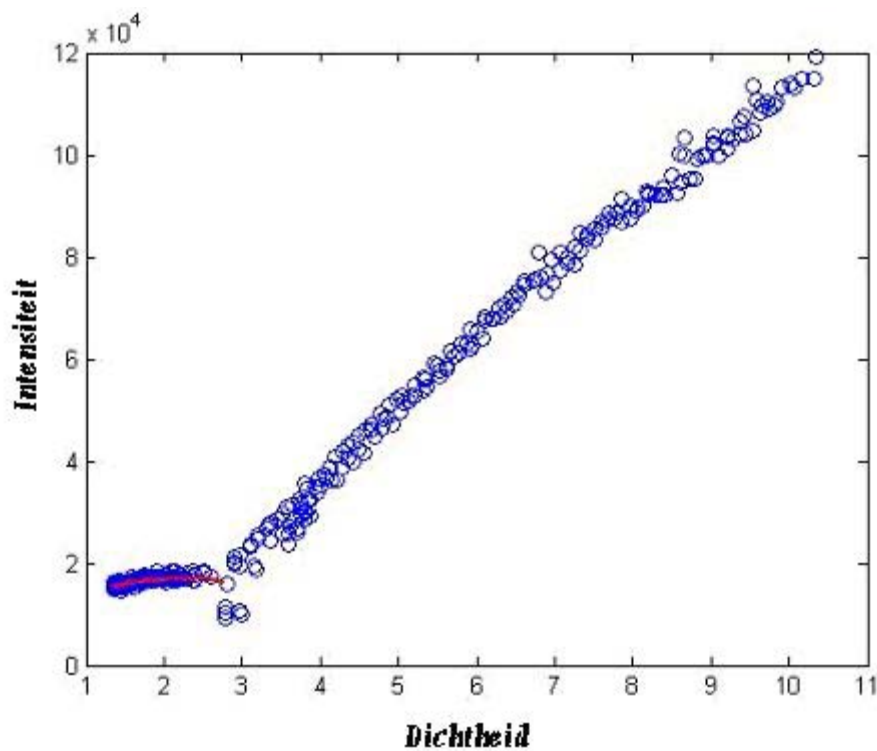
4.3.10 Case 10

In deze situatie zullen er per uur 5000 voertuigen worden toegevoegd aan de weg en 2500 aan de invoegstrook.



Figuur 48: Resultaten voor fundamenteel diagram.

Figuur 49: Resultaten voor drie-fasen theorie.



Figuur 50: Resultaten van 5 runs voor beide theorieën.

Uit de figuren 48 en 49 blijkt dat deze aantallen voertuigen uiteindelijk duidelijk in een vorm van congestie resulteren. Figuur 50 geeft hier voor de resultaten behorend bij de drie-fasen theorie een compleet ander beeld dan voor de resultaten behorend bij de gemiddelde resultaten van de theorie behorende bij het fundamenteel diagram.

4.4 Conclusie

Op basis van de resultaten zoals deze hierboven getoond zijn, kan er een tweetal conclusie worden getrokken.

Ten eerste vallen er in de 3D grafieken zoals deze behaald zijn voor de theorie behorende bij het fundamenteel diagram en de drie-fasen theorie geen verschillende patronen te ontdekken. Met andere woorden de patronen zoals deze gedefinieerd zijn volgens het modelleren van het verkeer in twee fasen verschillen niet met de patronen die tot de theorie behoren van het modelleren in drie fasen. Dus op basis van de congestiepatronen kan er geen voorkeur worden gegeven aan één van de twee methoden.

Door de dichtheid tegen de intensiteit uit te zetten voor de behaalde resultaten, is gebleken dat er wel degelijk een tweedimensionale regio wordt gevormd. Met andere woorden er zijn dus inderdaad meerdere mogelijke combinaties mogelijk tussen de dichtheid en de intensiteit. Echter tonen de waarden voor de dichtheid en intensiteit zoals deze worden behaald door het modelleren in twee fasen wel degelijk bruikbare waarden, aangezien deze waarden het gemiddelde weerspiegelen. Door gebruik te maken van het modelleren in drie fasen wordt er wel een gedetailleerder beeld getoond waarvoor wel uitgebreider rekenwerk is vereist.

5. Conclusie

Door middel van de vergelijking, op basis van de literatuur en de resultaten van het simulatieprogramma, van het modelleren van het verkeer in twee fasen en het modelleren in drie fasen blijken beide methoden bruikbaar te zijn. Dat wil zeggen dat beiden mogelijkheden ingezet zouden kunnen worden door modellen om zo een oplossing te vinden voor de filevorming.

Dit is zeker het geval wanneer de verschillende congestiepatronen in acht worden genomen, daar er hier geen verschil te ontdekken valt tussen de beide methoden. Echter geeft het modelleren van het verkeer in drie fasen een gedetailleerder beeld weer van het dichtheid-intensiteit figuur door alle mogelijke combinaties tussen de dichtheid en de intensiteit weer te geven, hetgeen wel meer rekenwerk en nauwkeurigheid vereist.

Maar ook de resultaten van het modelleren van het verkeer in twee fasen kunnen gebruikt worden in het dichtheid-intensiteit figuur, daar deze methode keurig de gemiddelde waarden van deze variabelen weergeeft, alleen zijn deze resultaten dus minder gedetailleerd.

Referenties

- [1] <http://www.cijfers.net/file.html>
- [2] S.D. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy (2001), *state-of-the-art of vehicular traffic flow modelling*, http://www.trail.tudelft.nl/T&E/papers_course_IV_9/state-of-the-art.PDF
- [3] L.H. Immers, S. Logghe (mei 2002), *Traffic flow theory*, <http://www.kuleuven.be/traffic/dwn/H111part3.pdf>
- [4] B.S. Kerner (mei 2002), *Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow*, <http://www.iop.org/EJ/article/0305-4470/33/26/101/a02611.html>
- [5] B.S. Kerner (augustus 2003), *Three-phase traffic theory and highway capacity*, http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0211/0211684.pdf
- [6] B.S. Kerner, *The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*, Springer
- [7] B.S. Kerner, S.L. Klenov (januari 2002), *A microscopic model for phase transitions in traffic flow*, J. Phys. A: Math. Gen. 35 (2002) L31-L43
- [8] B.S. Kerner, S.L. Klenov (juli 2005), *Deterministic approach to microscopic three-phase traffic theory*, http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0507/0507120.pdf
- [9] B.S. Kerner, S.L. Klenov (juli 2005), *Probabilistic breakdown phenomenon at on-ramp bottlenecks in three-phase traffic theory*, http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0502/0502281.pdf
- [10] B.S. Kerner, S.L. Klenov, A. Hiller (juli 2005), *Criterion for traffic phases in single vehicle data and empirical test of a microscopic three-phase traffic theory*, http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0507/0507094.pdf
- [11] R.J. Koppa (1975), *Human factors*, <http://www.tfrc.gov/its/tft/chap3.pdf>
- [12] S. Maerivoet, B. de Moar (December 2005), *traffic flow theory*, http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0507/0507126.pdf
- [13] T. Wijnendaele (2005), *Analyse en interpretatie van verkeersdata: een tijdreeksanalyse*, <http://www.kuleuven.be/traffic/dwn/E2005E.pdf>