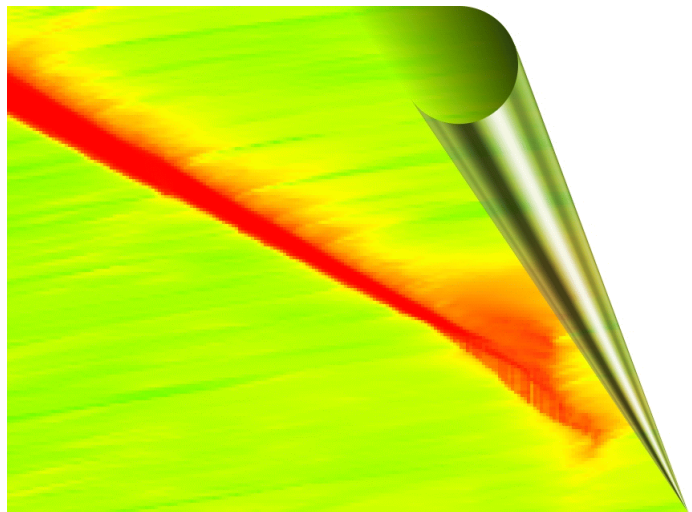


CURSUS FOSIM

Dictaat (Concept)

ir H. Botma, ir T. Dijker



december 2001



Rijkswaterstaat
Adviesdienst Verkeer en Vervoer

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Laboratorium voor Verkeerskunde

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	1
2	MACROSCOPISCHE VERKEERSSTROOMKENMERKEN	3
	2.1 Inleiding	3
	2.2 Voertuigtrajectorie	3
	2.3 Intensiteit	3
	2.4 Dichtheid	5
	2.5 Gemiddelde snelheid	5
	2.6 De relatie tussen intensiteit, dichtheid en snelheid	6
3	HET BASISDIAGRAM	9
	3.1 Inleiding	9
	3.2 Modellen voor het basisdiagram	12
	3.3 Invloed plaats meetlocatie	15
4	SCHOKGOLVEN	18
	4.1 Inleiding	18
	4.2 Afleiding snelheid van schokgolf	18
	4.3 Schokgolven en voertuigtrajectoriën	20
	4.3.1 Tijdelijke volledige blokkering	20
	4.3.2 Tijdelijke overbelasting van bottle-neck	22
5	CAPACITEITSTRECHTER EN SERIE-OPTIE	27
	5.1 Inleiding	27
	5.2 Capaciteitstrechter verklaard	27
	5.3 Capaciteit bepalen met de Serie-optie van Fosim	28
6	DE WERKING VAN FOSIM VERKLAARD	31
	6.1 Een enkelstrooks rijbaan zonder discontinuïteiten	31
	6.1.1 Het genereren van voertuigen	32
	6.1.2 Het handelen van de bestuurders	33
	6.1.3 De resulterende verkeersafwikkeling	35
	6.2 Een enkelstrooks rijbaan met snelheidsonderdrukking	37
	6.3 Een tweestrooks rijbaan zonder discontinuïteiten	39
	6.4 Een tweestrooks rijbaan met snelheidsonderdrukking	42
	6.5 Een tweestrooks rijbaan met een rijstrookvermindering	43
	6.6 Een tweestrooks rijbaan met een enkelstrooks uitvoering	46
	6.7 Een tweestrooks rijbaan met een enkelstrooks invoeging	47
	6.8 Een tweestrooks rijbaan met een enkelstrooks invoeging en snelheidsonderdrukking op de invoeging	47
	6.9 Een taperinvoeging en een rijstrookvermindering	48
	6.10 Een tweestrooks rijbaan met opeenvolgend een enkelstrooks invoeging en een enkelstrooks uitvoering	49
	6.11 Een 2+1 symmetrisch weefvak	49
	6.12 Weefvak of samenvoeging en splitsing?	50
	6.13 Ter afsluiting	50

Referenties	51
Literatuur algemeen	51

1 INLEIDING

Hoewel verkeersmodellen steeds eenvoudiger te bedienen zijn, is het in de praktijk toch niet triviaal een goede simulatiestudie uit te voeren. Dit komt doordat in modellen wel algemeen is vastgelegd hoe verkeersdeelnemers zich gedragen, maar niet hoe de verkeersafwikkeling eruit ziet in een specifieke, lokale situatie. Op dit punt is de inbreng van de gebruikers van het model essentieel. Zij moeten de werkelijkheid zodanig schematiseren tot modelinvoer dat het model tot realistische resultaten komt. Hiervoor is zowel goed inzicht in de verkeersstroomtheorie nodig als vaardigheid met een specifiek verkeersmodel, in dit geval FOSIM. Deze cursus beoogt op beide onderdelen een bijdrage te leveren.

Het deel over verkeersstroomtheorie (hoofdstuk 2 tot en met 5) heeft als hoofddoel FOSIM-gebruikers te laten zien dat de uitkomsten van het model overeenstemmen met elementaire resultaten van de verkeersstroomtheorie, die op hun beurt weer gebaseerd zijn op algemene kennis en wetmatigheden voor stromen en op een vergelijking met de realiteit. Het spreekt min of meer van zelf dat men dan eenvoudige geometrische cases moet gebruiken. Immers voor een complexe werkelijke situatie zal of complexe verkeersstroomtheorie nodig zijn of zal het zelfs daarmee niet lukken de reële verkeersafwikkeling te voorspellen. Dit laatste is natuurlijk ook een reden geweest om simulatiemodellen te ontwikkelen.

De meeste illustraties bij de theorie zijn dan ook ontleend aan simulaties voor de eenvoudige case van een rijbaan van 1 rijstrook met een toerit. Dit is voor een autosnelweg een uitzonderlijke situatie maar heeft het voordeel dat men de optredende verschijnselen nog eenvoudig kan begrijpen. Als een simulatiemodel eenvoudige situaties goed beschrijft, dan neemt het vertrouwen in zo'n model toe. Maar uiteindelijk zal kalibratie en validatie het overtuigende bewijs moeten leveren dat een model (voldoende) geschikt is voor toepassing bij praktische ontwerpproblemen. Aan dit aspect is overigens bij FOSIM veel aandacht besteed.

Het tweede deel van het dictaat (hoofdstuk 6) richt zich expliciet op het omgaan met FOSIM. Hierbij gaat het er vooral om inzicht te krijgen in de manier waarop de invoer tot bepaalde simulatieresultaten leidt. Deze kennis van de werking van FOSIM moet ertoe bijdragen dat men bij het uitvoeren van een simulatiestudie beter in staat is te begrijpen hoe het model tot bepaalde resultaten komt. Het is echter uiteraard niet de bedoeling dat elke gebruiker ook een semi-modelontwikkelaar moet zijn. Het verklaren van de werking van FOSIM gebeurt dan ook vooral door een groot aantal voorbeelden van simulaties te bespreken, begeleid door uitleg van de manier waarop FOSIM intern werkt.

Dit dictaat vervangt overigens zeker niet de handleidingen van FOSIM. In deze handleidingen staan veel praktische aanwijzingen voor het gebruik van FOSIM, terwijl het hier vooral gaat om achtergrondinformatie. Bij dit dictaat helpt het waarschijnlijk indien men al bekend is met de informatie uit de handleidingen.

2 MACROSCOPISCHE VERKEERSSTROOMKENMERKEN

2.1 INLEIDING

Belangrijke kenmerken van een verkeersstroom zijn intensiteit, dichtheid en snelheid. Deze kenmerken en enkele nauw verwante begrippen worden in deze paragraaf behandeld. Voor een beter inzicht in genoemde kenmerken is een visuele weergave van het individuele gedrag van voertuigen nuttig, daarom wordt eerst het begrip voertuig-trajectorie geïntroduceerd.

2.2 VOERTUIGTRAJECTORIE

Een weergave van een voertuigbeweging in een weg-tijddiagram wordt een voertuig-trajectorie genoemd. De voertuigbewegingen kunnen betrekking hebben op een rijstrook of een rijbaan en in het laatste geval op een- en tweerichtings verkeer. In figuur 1 is een voorbeeld van een aantal voertuigtrajectoriën voor verkeer in één richting weergegeven. Er komen inhaalmanoeuvres voor (snijpunten van trajectoriën) en het betreft dus een rijbaan met minstens twee rijstroken.

De snelheid van een voertuig $\mathbf{v}_i = \frac{d\mathbf{x}_i}{dt}$ is de raaklijn in een punt aan de trajectorie.

Ter plaatse $x = x_0$, dat is dus een wegdoorsnede, kan men passagemomenten, hun verschillen (volgtijden h_i , h van headway) en snelheden gedurende periode T beschouwen. Ten tijde $t = t_0$ kan men posities, hun verschillen (volgafstanden s_i) en snelheden beschouwen.

2.3 INTENSITEIT

De intensiteit is het aantal voertuigen, dat per tijdseenheid een wegdoorsnede passeert. De intensiteit kan betrekking hebben op de totale wegdoorsnede, op een deel van de wegdoorsnede (rijbaan, rijstrook) en op verkeer in één of beide richtingen.

Ook de tijdseenheid, die bij intensiteit wordt gebruikt, ligt niet vast. Gebruikt wordt etmaal, uur, kwartier, minuut en seconde. De tijdseenheid uur is echter wel de meest gebruikte eenheid.

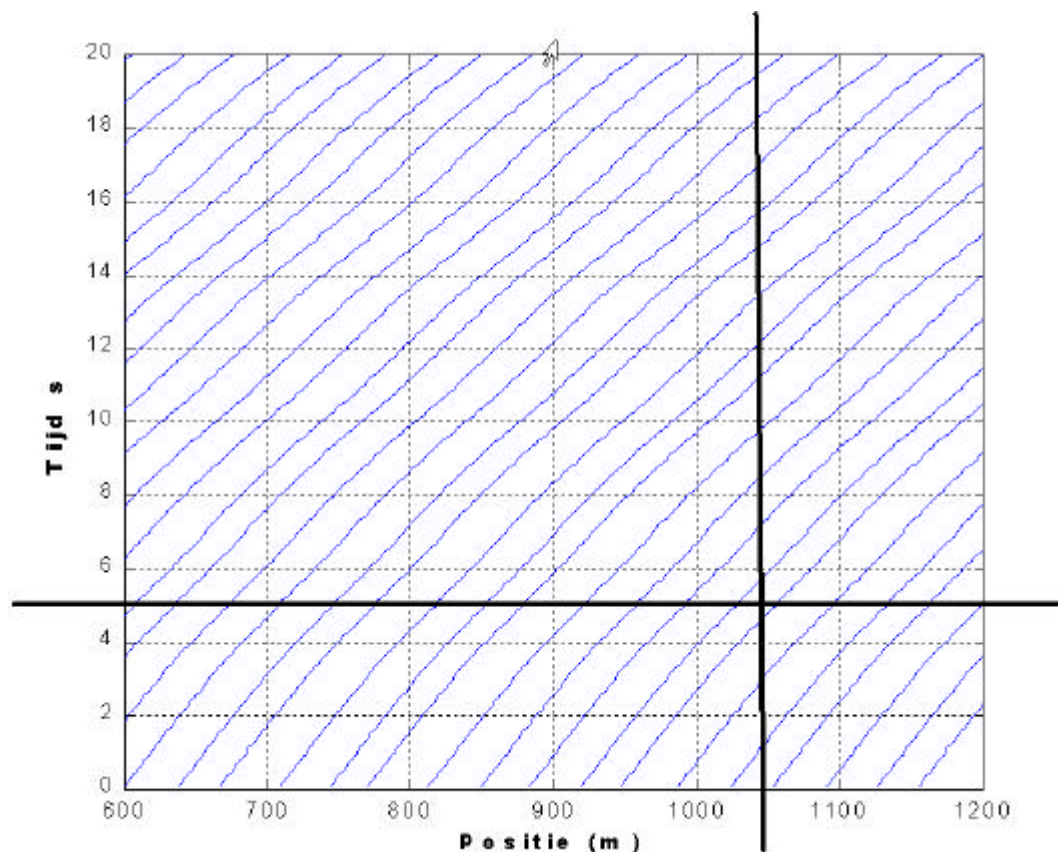
Naast de tijdseenheid is ook de tijdsduur, waarin de intensiteit bepaald wordt, van belang. Men dient deze twee goed uit elkaar te houden; in extremo is het bijvoorbeeld mogelijk het aantal voertuigen, dat per etmaal een doorsnede passeert, weer te geven in eenheid aantal/seconde.

De intensiteit is een van de meest bekende grootheden in de verkeerskunde, vooral omdat de intensiteit zonder of met zeer eenvoudige apparatuur te bepalen is.

Opmerking: Toch zal blijken dat de intensiteit niet de beste grootheid is om de verkeersdrukke (of formeler, de verkeersstroomtoestand) te karakteriseren.

Het tellen op een doorsnede van de passage van een bepaald punt van de auto (b.v. achterbumper) gedurende een zekere tijd T levert de intensiteit:

$$q = \frac{n}{T} \quad [\text{aantal voertuigen/tijdseenheid}] \quad (1)$$



Figuur 1: Voertuig-trajectoriën: observatie mogelijk op doorsnede (verticale lijn) en op moment (horizontale lijn)

Zoals uit figuur 1 blijkt, bestaat periode T uit de som van de volgtijden h_i , waarin h_i het tijdverschil is van de aankomstmomenten van opeenvolgende voertuigen.

Dan wordt:

$$q = \frac{n}{T} = \frac{n}{\sum h_i} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum h_i} = \frac{1}{\bar{h}} \quad (2)$$

waarin $\bar{h} = \frac{1}{n} \sum h_i = \text{gemiddelde volgtijd}$.

Het spreekt vanzelf dat men bij berekeningen met formule (2) bij elkaar passende eenheden moet gebruiken; dus niet q in vtg/h en h in s .

2.4 DICHTHEID

De dichtheid is het aantal voertuigen, dat per eenheid van weglengte op een zeker tijdstip aanwezig is. Evenals de intensiteit kan de dichtheid betrekking hebben op de totale weg, op de rijbaan of op de rijstrook.

Gebruikelijke eenheden voor dichtheid zijn: aantal voertuigen/km of aantal voertuigen/m.

Dichtheid is aanzienlijk moeilijker te bepalen dan intensiteit. Een methode is fotografie vanuit een luchtvoertuig of vanaf een hoge standplaats, waarbij de dichtheid bepaald wordt door het tellen van het aantal voertuigen, dat zich ten tijde t op een bepaald wegvak van lengte X bevindt.

De dichtheid k wordt dan:

$$k = \frac{n}{X} \quad [\text{aantal voertuigen/lengte-eenheid}] \quad (3)$$

Zoals uit figuur 1 blijkt bestaat X uit de som van de volgfstanden s_i , zodat:

$$k = \frac{n}{\sum s_i} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum s_i} = \frac{1}{\bar{s}} \quad (4)$$

De dichtheid is dus het omgekeerde van de gemiddelde volgfstand.

2.5 GEMIDDELDE SNELHEID

- De gemiddelde snelheid kan op verschillende manieren bepaald worden: stel we meten de snelheden v_i van n voertuigen op een doorsnede gedurende een zekere tijd. Het rekenkundig gemiddelde van deze snelheden wordt genoemd: **de lokale gemiddelde snelheid:**

$$u_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (5)$$

- Stel op een wegvak bevinden zich ten tijde t m voertuigen met snelheden v_j . Het gemiddelde van deze snelheden wordt genoemd de **momentane gemiddelde snelheid:**

$$u_M = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_j \quad (6)$$

De snelheden op een wegvak kunnen bepaald worden door twee luchtopnamen met een korte tussentijd (b.v. 1 s) te maken. Uit de op te meten posities kunnen dan snelheden bepaald worden.

Het blijkt echter ook mogelijk om de momentane gemiddelde snelheid uit waarnemingen op een doorsnede te schatten.

2.6 DE RELATIE TUSSEN INTENSITEIT, DICHTHEID EN SNELHEID

Wanneer een verkeersstroom min of meer in evenwicht verkeert, dan geldt de relatie:

$$q = k u \quad (7)$$

In woorden: de hoeveelheid deeltjes, die per tijdseenheid een doorsnede passeert (q) is het product van:

- de hoeveelheid deeltjes per lengte-eenheid (k), en
- de afstand die door die hoeveelheid per tijdseenheid wordt afgelegd (u).

Uit deze algemene formulering blijkt al dat deze relatie zal gelden voor allerlei soorten stromingen (vloeistof, gas, voetgangers, enz). De vraag is echter welke van de in het voorgaande behandelde gem. snelheden in formule (7) hoort.

Het antwoord kan men als volgt beredeneren: In een evenwichtstoestand verdelen we de verkeersstroom in uniforme klassen met dichtheden k_i vtg/km, die met een uniforme snelheid u_i km/h op het beschouwde wegvak rijden. Een klasse van voertuigen draagt bij aan de intensiteit: $q_i = k_i u_i$.

De totale intensiteit wordt dan:

$$q = \sum q_i = \sum k_i u_i \quad (8)$$

De totale dichtheid wordt bepaald door:

$$k = \sum k_i \quad (9)$$

De gemiddelde snelheid moet daarom zijn:

$$u = q/k = \frac{\sum k_i u_i}{\sum k_i} \quad (10)$$

De gemiddelde snelheid wordt dus bepaald door weging van alle snelheidsklassen naar rato van de dichtheid in die snelheidsklasse en is derhalve de **momentane gemiddelde snelheid**.

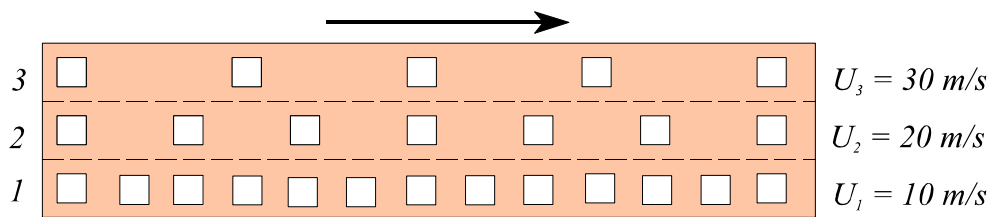
Als we k_i vervangen door $k_i = q_i / u_i$, dan wordt de vergelijking voor de snelheid:

$$u = \frac{q}{k} = \frac{\sum q_i}{\sum q_i / u_i} \quad \text{of} \quad \frac{1}{u} = \frac{\sum q_i (1/u_i)}{\sum q_i} \quad (11)$$

Dus het omgekeerde van de gem. snelheid is een weging van de omgekeerde snelheden per klasse met gewicht q_i . Dan is u het zgn. **harmonisch gemiddelde** van de snelheden u_i .

Voorbeeld:

Op een rijbaan van een autosnelweg is de volgtijd op alle drie de rijstroken hetzelfde voor alle voertuigen. De snelheden verschillen per rijstrook maar zijn binnen een rijstrook constant; zie figuur 2.



Figuur 2: Voorbeeld van rijbaan van snelweg met per rijstrook uniform verkeer

Tabel 1: Karakteristieke waarden van de rijstroken en de rijbaan

Rijstrook	h_{gem} (s)	u (m/s)	s_{gem} (m)	k (vtg/km)	q (vtg/h)
1	5	10	50	20	720
2	5	20	100	10	720
3	5	30	150	$6\frac{2}{3}$	720
Rijbaan	5			$36\frac{2}{3}$	2160

$$q = k u \Rightarrow u = 2160/36\frac{2}{3} = 16.36 \text{ m/s}$$

Iedere 5 s passeert er een auto op elke strook; drie auto's geven dus alle informatie over de snelheid

$$u_L = (10 + 20 + 30)/3 = 20 \text{ m/s}$$

u_M is het harmonische gemiddelde van 10, 20 en 30.

$$u_M = 1 / \{(1/10 + 1/20 + 1/30)/3\} = 16.36 \text{ m/s}$$

We zien dus dat momentane gemiddelde snelheid u_M in de relatie $q = k u$ hoort.

In FOSIM wordt op de meettraaien de momentaan gemiddelde snelheid per rijstrook bepaald.

3 HET BASISDIAGRAM

3.1 INLEIDING

In het vorige hoofdstuk is afgeleid dat tussen de drie verkeersstroomkenmerken intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid de relatie $q = k u$ geldt; waarin q = intensiteit (vtg/h), k = dichtheid (vtg/km), en u = momentane gemiddelde snelheid (km/h). Dit is een relatie die min of meer per definitie geldt voor elke stroom van bijv. een gas, een vloeistof, voetgangers.

Daarnaast zijn er relaties tussen 2 van de 3 kenmerken q , k en u die ontstaan door de specifieke eigenschappen van hetgeen dat stroomt. In de verkeersstroomtheorie worden deze relaties 'basisdiagram' genoemd (fundamental diagram). Er zijn er drie in gebruik, nl.:

intensiteit - dichtheid	$q = q(k)$
snelheid - dichtheid	$u = u(k)$
snelheid - intensiteit	$u = u(q)$.

Belangrijk is te beseffen dat deze drie functies dezelfde informatie bevatten; men kan uit één functie de andere twee afleiden.

Alvorens een aantal modellen te behandelen, is het nuttig een aantal eigenschappen te noemen, die de vorm van de relatie ten dele bepalen. Deze eigenschappen van de functie $q(k)$ zijn:

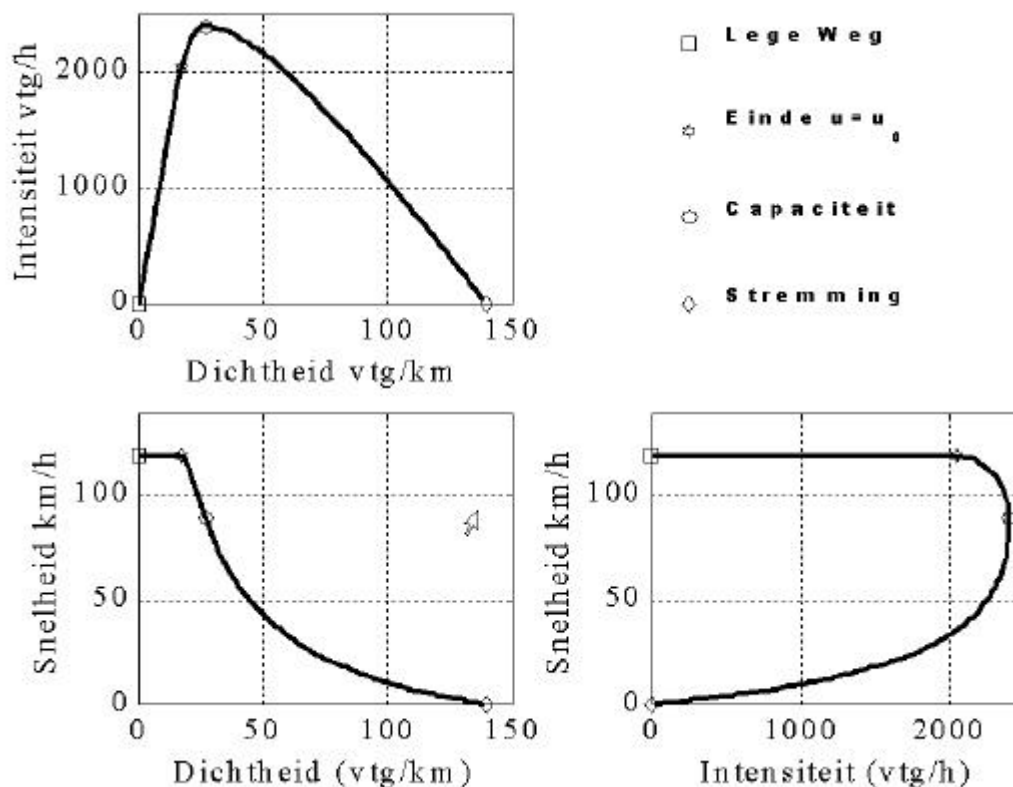
- als er geen dichtheid is, is er geen intensiteit; $q = q(k)$ gaat door de oorsprong;
- voor lage intensiteiten en dichtheden zal de gem. snelheid constant zijn, d.w.z. de functie $q(k)$ begint met een recht gedeelte;
- naarmate het drukker wordt zullen de voertuigen meer hinder van elkaar onder vinden en zal de gemiddelde snelheid dalen; dit leidt tot een afbuigen van de kromme;
- het is aannemelijk dat de intensiteit begrensd is door een maximum, de capaciteit;
- het is waarneembaar dat er hoge dichtheden zijn zonder intensiteit, d.w.z. er kan een stilstaande file optreden (het stremmingspunt);
- tenslotte wordt verondersteld dat er tussen het capaciteitspunt en het stremmingspunt ook een continue relatie is tussen intensiteit en dichtheid.

In figuur 3 is de relatie $q = q(k)$ weergegeven. Er zijn een aantal markante punten, nl.:

- (gemiddelde) vrije snelheid u_0 ; dit is de snelheid als $q = 0$ en $k = 0$, gelijk aan de tangens van de raaklijn in de oorsprong aan de functie $q(k)$;
- capaciteit q_c ; dit is de maximale waarde van de intensiteit, ook wel aangeduid met de kritische intensiteit;
- capaciteitsdichtheid of kritische dichtheid k_c ; dit is de dichtheid bij $q = q_c$;
- capaciteitssnelheid of kritische snelheid u_c ; dit is de gem. snelheid bij $q = q_c$;
- stremmingsdichtheid k_s voor $u = 0$ en $q = 0$.

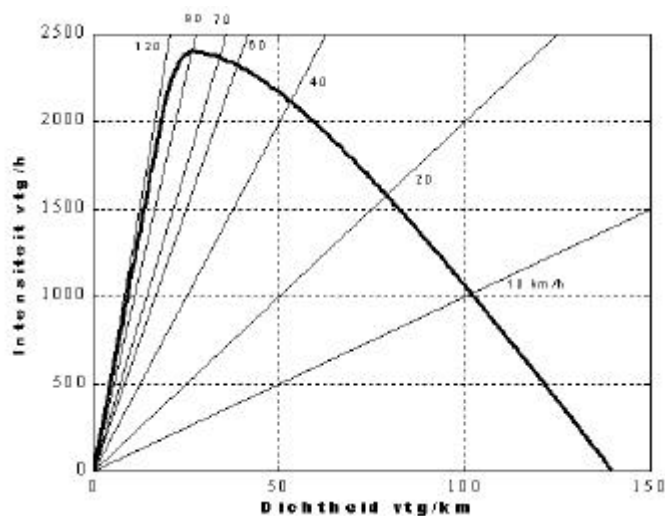
Merk daarbij op dat $u(q)$ een tweewaardige functie is, d.w.z. bij één waarde van q horen twee waarden van u . Tevens is te zien dat de capaciteit in $u(k)$ geen bijzonder punt is.

Het gedeelte van $q(k)$ met constante snelheid wordt wel het 'stabiele' gebied genoemd; zodra de snelheid gaat dalen komt men in het 'instabiele' gebied terecht en rechts van het capaciteitspunt ligt de 'congestietak'. Het hele gebied met dichtheden kleiner dan de capaciteitsdichtheid wordt ook wel met 'vrije afwikkeling' aangeduid en de congestietak met 'gedwongen afwikkeling'.



Figuur 3: De drie samenhangende vormen van het basisdiagram

Uit de algemene vorm van de basisdiagrammen volgt dat de dichtheid de meest bepalende variabele is voor de toestand van de verkeersstroom (we verstaan onder toestand het drietal $[q / k / u]$). Immers, uit de intensiteit volgt niet of de verkeersstroom in vrije afwikkeling of in congestie verkeert. Uit de snelheid volgt dat wel maar in de vrije tak valt uit de snelheid of geen of maar beperkte informatie over de waarden van intensiteit en dichtheid af te leiden.



Figuur 4: Basisdiagram $q(k)$ met lijnen van constante snelheid

Uit figuur 4 blijkt nog eens duidelijk dat in congestie bij lage snelheden toch nog relatief hoge intensiteiten mogelijk zijn, bijvoorbeeld bij 20 km/h nog een intensiteit van ruim 1600 vtg/h. Bedacht moet wel worden dat de congestietak, zoals hier en in de overige figuren weergegeven, een optimale prestatie van de bestuurders representeert. In werkelijkheid, en ook bij gebruik van FOSIM, zal men vaak punten onder de congestiecurve aantreffen. Introductie van intelligente cruise control, die niet alleen de snelheid regelt maar ook te kleine en te grote volgafstanden voorkomt, zou hier verbetering in kunnen brengen.

Belang van het basisdiagram

- Afwikkelingsniveau's. De bekende afwikkelingsniveau's uit het Amerikaanse handboek Highway Capacity Manual (de letters A, B,...,F) die een maatstaf zijn voor de kwaliteit van de verkeersafwikkeling hangen sterk samen met het basisdiagram.
- In feite geeft het basisdiagram ook informatie over de relatie tussen intensiteit en reistijd en die kan onder meer worden gebruikt in toedielingsmodellen.
- Veelal vormt het basisdiagram een onderdeel van meer uitgebreide modellen van de verkeersstroom, zoals zal blijken in paragraaf 3 over schokgolven.
- Het bepalen van de capaciteit wordt soms op een bepaalde vorm van het basisdiagram gebaseerd.

Invloedsfactoren

Het basisdiagram is geen fysische wetmatigheid maar zal variëren in afhankelijkheid van wegfactoren, bestuurders- en voertuigfactoren en condities. Praktisch zijn de belangrijkste invloedsfactoren:

- Type weg en daarbinnen wegkenmerken, zoals bochtigheid en rijstrookbreedte;
- Voertuigsamenstelling; dit wordt meestal operationeel gemaakt in het percentage personen- en vrachtauto's;
- Soort verkeer met betrekking tot overheersend motief van verplaatsing [woonwerk-verkeer over betrekkelijk korte afstanden gedraagt zich anders dan vakantieverkeer over grote afstanden];
- Maatregelen als snelheidslimieten, hetzij permanent of dynamisch;
- Lichtcondities, bijv. duisternis of daglicht;

- Weerscondities, droog of regen.

Deze factoren hebben invloed op het hele basisdiagram, dus ook zeker op de waarde van de capaciteit.

In de loop der tijd veranderen de voertuigen (betere wegligging, remvermogen en comfort) en de bestuurders (rijervaring, in het bijzonder in druk verkeer). Dit heeft onder meer tot gevolg dat de capaciteit van snelwegen stijgt; naar schatting de laatste decennia in Nederland met $\frac{1}{2}$ tot 1 % per jaar.

In het Amerikaanse handboek de Highway Capacity Manual is de capaciteit van een rijstrook (onder ideale condities voor wat betreft weg, verkeer en externe condities) in de eerste editie van 1950 gesteld op 2000 car/h en in de 2000-editie op 2400 car/h; dit komt neer op een gemiddelde groei van 0.37 % per jaar.

3.2 MODELLEN VOOR HET BASISDIAGRAM

- **Het basisdiagram van Greenshields (1934)**

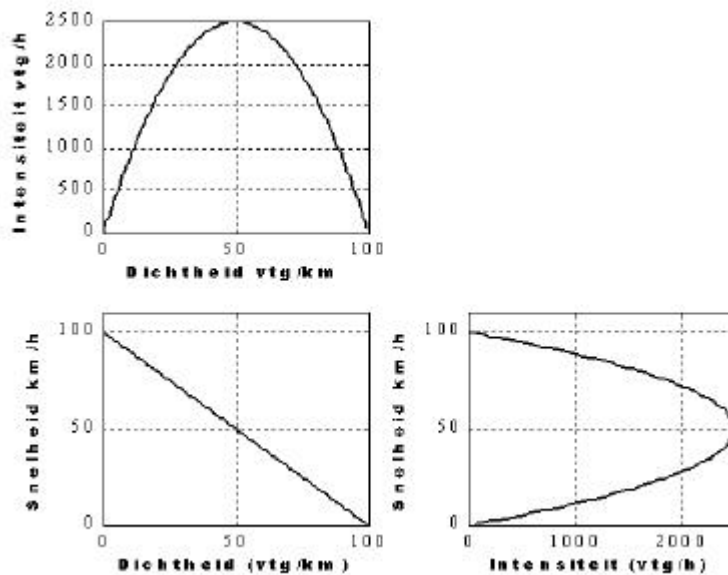
Dit is een van de oudste modellen met als achtergrond de eenvoudige gedragsveronderstelling dat de gem. snelheid met toenemende dichtheid lineair zal dalen. Het model is gebaseerd op 7 (zeven!) datapunten verkregen met behulp van luchtfotografie.

$$u(k) = u_0 (1 - k/k_s) \quad (12)$$

waarin u_0 = vrije snelheid en k_s = stremmingsdichtheid.

Het model van Greenshields wordt nog veel gebruikt vanwege zijn eenvoud; zie figuur 5. Het wijkt voor snelwegen duidelijk af van de huidige realiteit voor wat betreft:

- u daalt niet meteen sterk vanaf $k = 0$;
- de capaciteitsdichtheid is in werkelijkheid veel kleiner dan de helft van de stremmingsdichtheid.



Figuur 5: Het model van Greenshields

• Het basisdiagram van De Romph

De Romph (1994) heeft in het kader van de ontwikkeling van zijn toedelingmodel het volgende basisdiagram gebruikt.

$$\begin{aligned} u(k) &= u_0 (1 - \alpha k) && \text{voor } k < k_c \\ u(k) &= \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_s} \right)^\beta && \text{voor } k > k_c \end{aligned} \quad (13)$$

Parameters: u_0 , k_c , k_s , α , β , γ

Door de geëiste continuïteit bij $k=k_c$ blijven er 5 onafhankelijke parameters over.

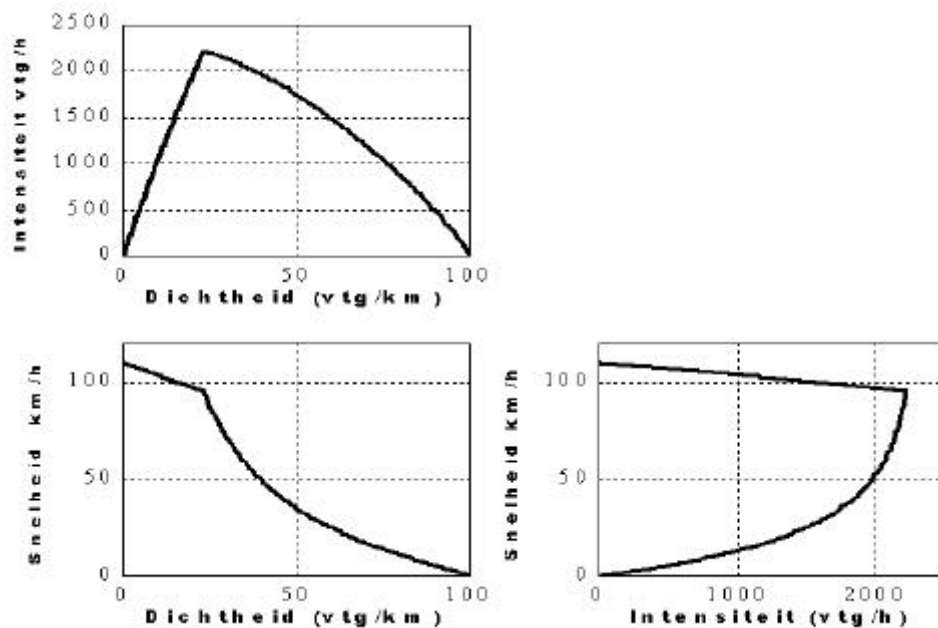
Af te leiden is dat $\gamma = u_0 (1 - \alpha k_c) / (1/k_c - 1/k_s)^\beta$

Met uitvoerige metingen op de ring van Amsterdam zijn de parameters van dit model geschat voor diverse elementen; bijvoorbeeld voor 2- en 3-strooksrijbanen, voor éénstrooks toe- en afritten, voor een 3-strooksrijbaan in een tunnel, enz.

Voor een 3-strooksrijbaan is, gemiddeld over 3 stroken, het resultaat:

$u_0 = 110$ km/h; $k_c = 23$ vtg/km; $\alpha = 5.7_{10^{-3}}$; $\beta = 0.84$

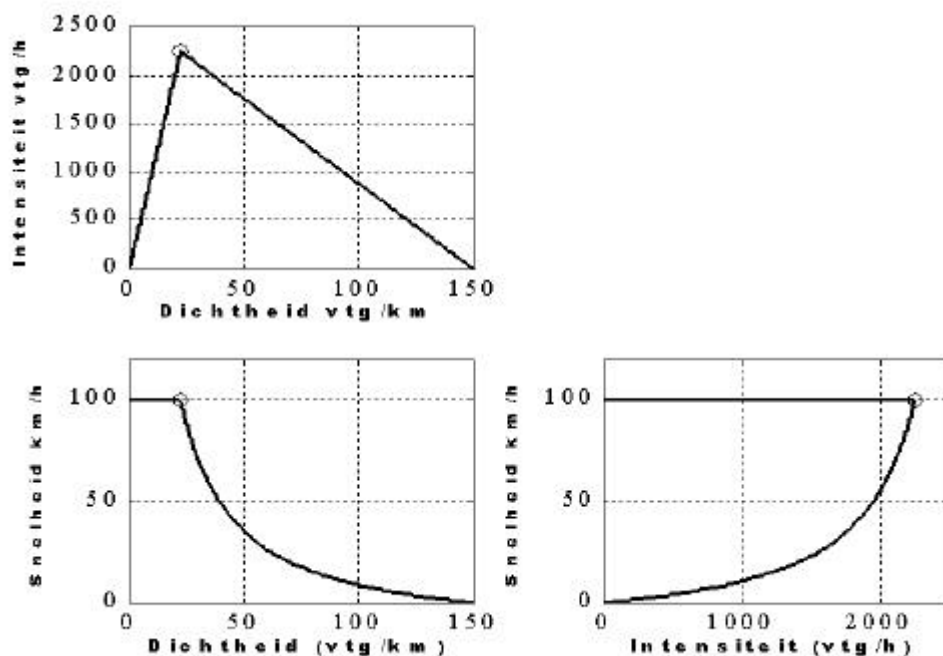
Aangenomen is: $k_s = 100$ vtg/km. Dan volgt: $\gamma = 1672$ en $\text{cap.} = 2215$ vtg/h. Zie Figuur 6.



Figuur 6: Basisdiagram van De Romph voor een driestrooks rijbaan

- **Het geschematiseerde basisdiagram van Daganzo**

Bij ontwikkeling van nieuwe modellen voor verkeersafwikkeling heeft men behoefte aan een eenvoudig basisdiagram wat wel de kern van het gedrag van een verkeersstroom weergeeft.



Figuur 7: Basisdiagram van Daganzo

Naast het eerder genoemde model van Greenshields, de symmetrische parabool $q(k)$, is er recent een alternatief opgesteld door Daganzo; zie figuur 7. Dit model heeft drie parameters: u_0 , q_c (of k_c) en k_s .

Opm. Kiest men bij het basisdiagram van De Romph parameter " gelijk aan 0 en parameter \$ gelijk aan 1, dan gaat het over in het diagram van Daganzo.

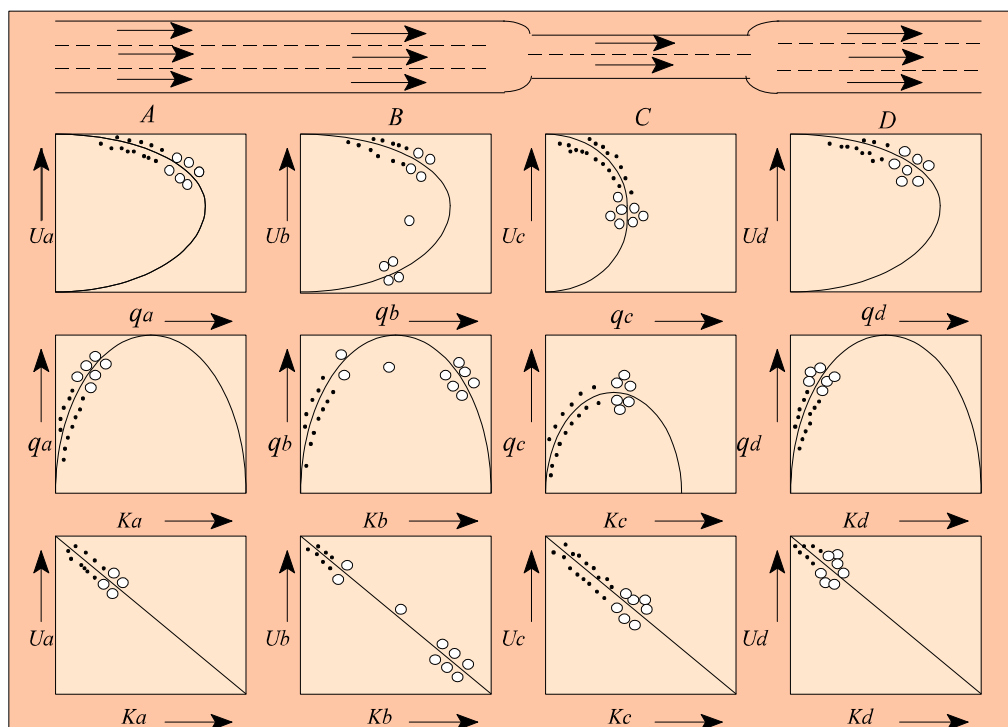
3.3 INVLOED PLAATS MEETLOCATIE

Voor het verkrijgen van kwantitatief inzicht in het basisdiagram dient men metingen te doen op met zorg gekozen plaatsen en tijden. Dit zal worden geïllustreerd met de resultaten die men verkrijgt bij observaties rondom en in een bottle-neck (b-n).

In figuur 8 is een wegvak van een rijbaan van een autosnelweg geschetst van 3 rijstroken breed met daarin een bottle-neck waar de rijbaan slechts 2 rijstroken breed is (bijvoorbeeld ten gevolge van wegwerkzaamheden).

Er worden metingen gedaan op 4 doorsneden, te weten:

- A: deze doorsnede ligt zover bovenstrooms van de b-n dat eventuele congestie t.g.v. overbelasting van de b-n doorsnede A niet bereikt.
- B: ligt niet zover bovenstrooms van de b-n en eventuele congestie zal B wel bereiken.
- C: een doorsnede in de b-n.
- D: een doorsnede benedenstrooms van de b-n



Figuur 8: Verkeersstroomtoestanden op diverse doorsneden bij een overbelaste bottleneck

De theoretische basisdiagrammen (model Greenshields is gebruikt) van de vier doorsneden zijn de getrokken lijnen in Figuur 8. Ze zijn identiek voor doorsneden A, B en D en gelijkvormig maar met een lagere capaciteit en stremmingsdichtheid voor doorsnede C.

We nemen aan dat de intensiteit van een lage waarde geleidelijk toeneemt tot aan een waarde die net ligt onder de capaciteit van de b-n; capaciteit b-n = $2xC$ met C = cap. van 1 rijstrook. De meetpunten die uit een dergelijk belasting voortvloeien zijn aangegeven als * in de diagrammen.

Op doorsneden A, B en D komt de intensiteit niet hoger dan $2/3$ maal de capaciteit ($=3xC$). Er is daar dus sprake van vrije afwikkeling met relatief hoge snelheden. Op doorsnede C daarentegen wordt bijna de capaciteit bereikt en zijn de snelheden dan ook wat lager.

We nemen vervolgens aan dat de intensiteit verder stijgt tot aan een waarde die overeenkomt met de capaciteit van $2\frac{1}{2}$ rijstrook. Welke datapunten zal men nu observeren op de 4 doorsneden?

- A: Gesteld is dat de congestie deze doorsnede niet bereikt; dus er blijft hier sprake van vrije afwikkeling. De datapunten, aangegeven met een open cirkeltje, liggen in de intensiteitsrange 4000 tot 5000 vtg/h en de gemiddelde snelheid blijft even hoog.
- B: Bij de ingang van de b-n ontstaat congestie die zich in stroomopwaartse richting uitbreidt en na enige tijd doorsnede B bereikt. Voor dat moment liggen de datapunten nog op de vrije tak van het diagram en daarna op de congestietak. De intensiteit is dan (gemiddeld) gelijk aan de capaciteit van de b-n en de gem. snelheid gelijk aan de waarde die bij deze intensiteit hoort volgens de congestietak van het diagram (in dit geval orde 30 km/h).
- C: In de b-n is de intensiteit begrensd tot de capaciteit van de b-n en de toestand blijft ongeveer zoals ze was aan het eind van de eerste intensiteitsstijging.
- D: Hier is de intensiteit niet groter dan $2xC$, immers de b-n laat niet meer door. De afwikkeling blijft er dus vrij met hoge snelheden.

Als de intensiteit hierna weer daalt zal het omgekeerde proces plaats vinden.

Het geheel overziende blijkt dat op doorsnede A en D alleen vrije afwikkeling wordt waargenomen. In de bottle-neck kan men de hele vrije tak tot en met de capaciteits-toestand observeren. De meest verschillende toestanden worden waargenomen op doorsnede B. Ook hier is het echter nog zo dat men maar beperkte informatie van de congestietak verkrijgt.

Voor het compleet bemeten van de congestietak heeft men een b-n nodig die varieert van capaciteit 0 tot aan, in dit geval, $3xC$.

Het voorgaande leidt tot twee conclusies:

- De plaats waar men data verzamelt bepaalt welke verkeersstroomtoestanden men kan waarnemen.
- Alleen in een bottle-neck kan een capaciteitstoestand langdurig optreden. Indien men uit observaties, die niet ter plaatse van een bottle-neck zijn gedaan, de capaciteit wil afleiden, dan is er altijd een of andere vorm van extrapolatie nodig.

Bij gebruik van FOSIM voor het bepalen van de capaciteit zal men dus:

- *moeten zorgen voor overbelasting;*
- *constateren wanneer die optreedt door te signaleren of er congestie bovenstrooms van de b-n optreedt;*
- *de capaciteit van de bottle-neck bepalen door de intensiteit in de bottle-neck te registreren bij congestie.*

4 SCHOKGOLVEN

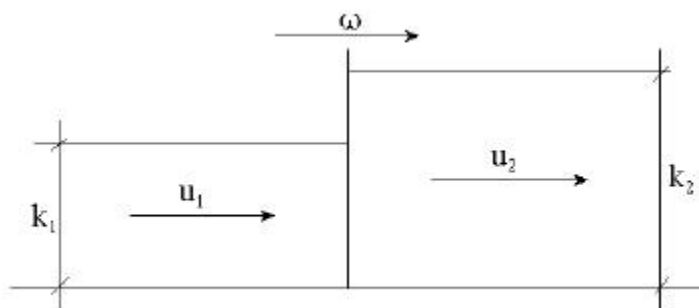
4.1 INLEIDING

Het basisdiagram kan opgevat worden als een model voor mogelijke toestanden waarin een verkeersstroom zich kan bevinden. Het gaat daarbij om min of meer statische toestanden of toestandsveranderingen die relatief langzaam verlopen. Voor de beschrijving van snellere veranderingen in verkeersstroomtoestanden heeft men aan het basisdiagram niet genoeg. In deze paragraaf over schokgolven zullen deze veranderingen aan de orde komen, ze zijn vooral relevant als congestie, in algemene zin, een rol speelt.

4.2 AFLEIDING SNELHEID VAN SCHOKGOLF

De golven, die optreden in een verkeersstroom, worden onderscheiden in schokgolven en kinematische golven. Schokgolven zijn de golven die ontstaan bij plotselinge aanzienlijke veranderingen in de toestand van de verkeersstroom. Is de toestandsverandering heel klein dan gaat een schokgolf over in een zogenaamde kinematische golf.

In figuur 9 is een schokgolf schematisch weergegeven; het is de grens van twee gebieden met een verschillende verkeersstroomtoestand.



Figuur 9: Afleiding snelheid schokgolf

De toestand in het linker gebied is (k_1, u_1) en in het rechter gebied (k_2, u_2) . De scheidslijn S is de schokgolf met een snelheid T .

De relatieve snelheden ten opzichte van de lijn S worden voor het linker gebied: $u_1 - T$ en voor het rechter gebied: $u_2 - T$

Kijken we naar het linker gebied dan is de intensiteit over de lijn S

$$q_{1,rel} = k_1 (u_1 - T)$$

Idem voor het rechter gebied:

$$q_{2,rel} = k_2 (u_2 - T)$$

Deze beide aantallen moeten aan elkaar gelijk zijn want in de grenslijn S kunnen geen voertuigen worden opgeslagen of ontstaan; dus:

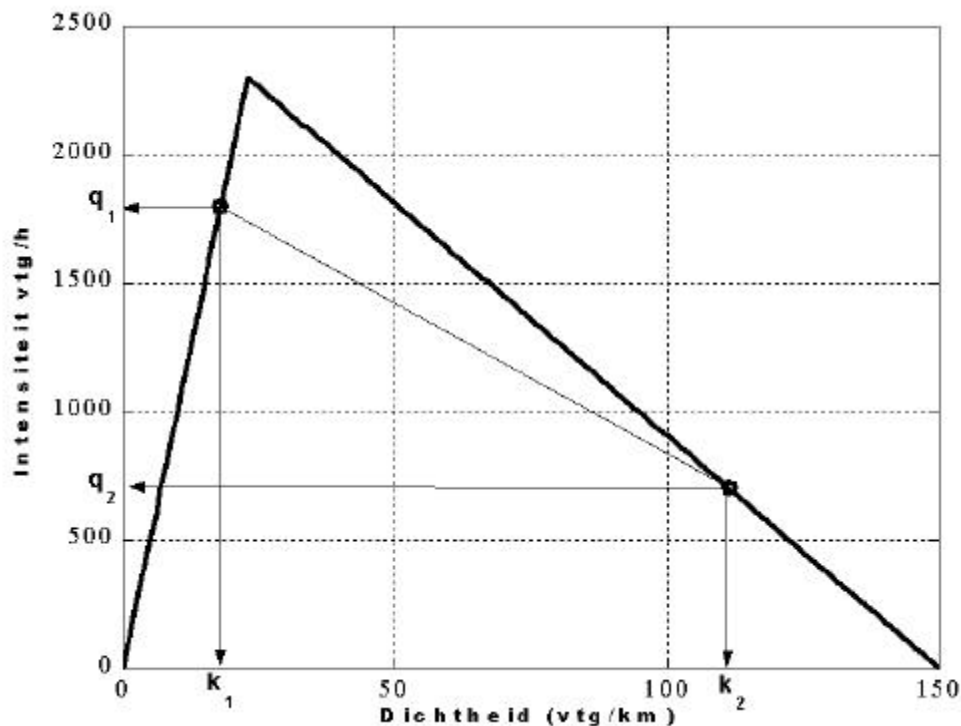
$$k_1(u_1 - T) = k_2(u_2 - T)$$

Hieruit volgt:

$$\omega = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2} \quad (14)$$

Bij een kleine verandering in q en k gaat vergelijking (14) over in $T = dq/dk$ en in de limiet geldt $T = dq/dk$. M.a.w. de kinematische golf is de limiet van de schokgolf.

Zie figuur 10 en 11 ter illustratie.



Figuur 10: Representatie schokgolf in q - k -vlak

In deze figuur zijn aangegeven:

1. verkeersstroom in toestand q_1, k_1
2. verkeersstroom in toestand q_2, k_2
3. de schokgolf die ontstaat wanneer verkeer van toestand (q_1, k_1) overgaat in toestand (q_2, k_2) , met snelheid $T = (q_2 - q_1) / (k_2 - k_1)$. Omdat $(q_2 - q_1)$ negatief is en $(k_2 - k_1)$ positief is T in dit geval negatief en plant de schokgolf zich voort tegen de richting van het verkeer in.

Figuur 11: Schokgolf en voertuigtrajectoriën in het weg-tijdvlak

4.3 SCHOKGOLVEN EN VOERTUIGTRAJECTORIËN

De werking van schokgolven en voertuigtrajectoriën wordt toegelicht aan de hand van twee voorbeelden, namelijk:

- tijdelijke volledige blokkering;
- tijdelijke overbelasting van een bottle-neck.

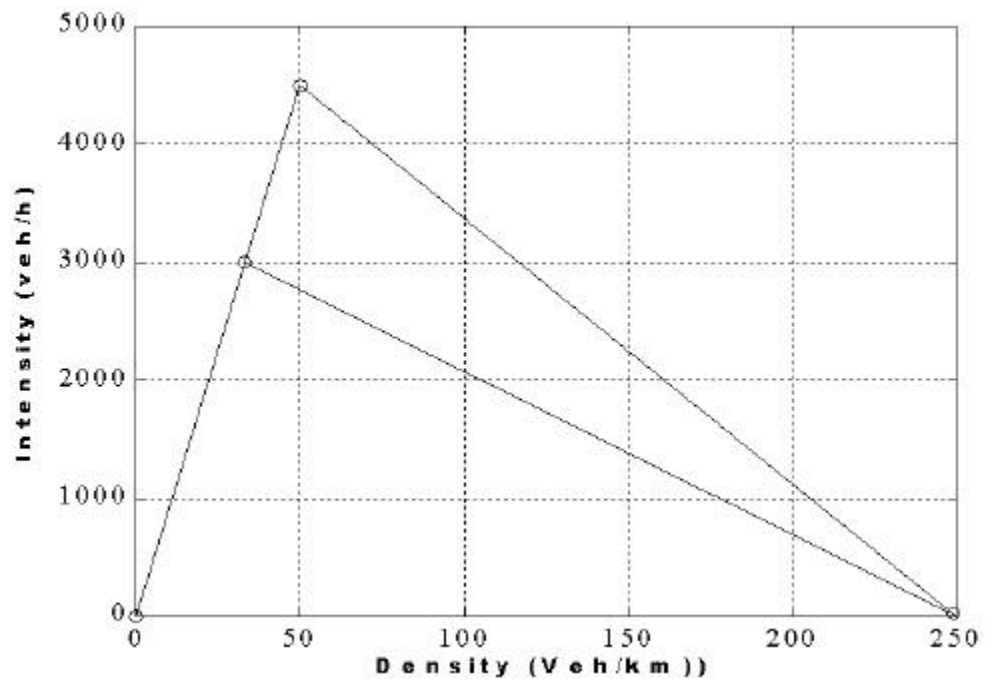
4.3.1 *Tijdelijke volledige blokkering*

FOSIM wordt niet gebruikt om het effect van blokkeringen te onderzoeken. Maar een tijdelijke blokkering is een goed voorbeeld om toepassing van het basisdiagram en schokgolven te illustreren. Blokkeringen komen in de praktijk voor bij geopende bruggen, werkzaamheden, incidenten en ongevallen.

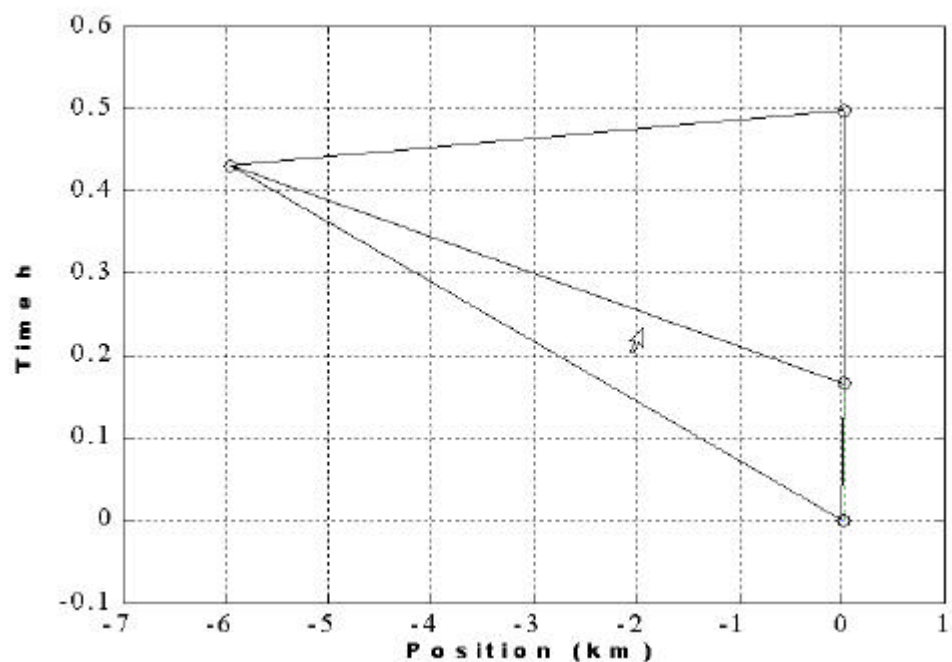
We zullen dit behandelen aan de hand van het volgende voorbeeld.

Stel een tweestrooksrijbaan van een autosnelweg wordt gedurende een 10 minuten geblokkeerd door een brugheffing. Het gebeurt buiten de spits; de intensiteit is 3000 vtg/h bij een gemiddelde snelheid van 90 km/h.

De capaciteit van de rijbaan wordt gesteld op 4500 vtg/h en de gem. snelheid bij de capaciteit op 90 km/h. Tenslotte wordt een stremmingsdichtheid aangenomen van 250 vtg/km (dat is 125 per rijstrook).



Figuur 12: Schokgolven ten gevolge van tijdelijke blokkering



Figuur 13: Schokgolven in x-t-vlak ten gevolge van tijdelijke blokkering

Op het moment van de blokkering ontstaat er een schokgolf, de overgang tussen vrij rijdend verkeer en stremming, de zogenaamde stopgolf met snelheid T_1

$$\omega_1 = \frac{q_1 - 0}{k_1 - k_s} = \frac{q_1}{q_1/u_1 - k_s} \quad (15)$$

Voorbeeld: $T_1 = 3000 / (3000/90 - 250) = -13.8$ km/h

Na een kwartier heeft de stilstand dus een punt $13.6/6 = 2.3$ km stroomopwaarts van de blokkering bereikt.

Na het eind van de blokkering ontstaat er een tweede schokgolf bij de stopstreep, de overgang van stremming naar capaciteitstoestand, de zogenaamde startgolf met snelheid T_2 .

$$\omega_2 = \frac{q_c - 0}{k_c - k_s} = \frac{q_c}{q_c/u_c - k_s} \quad (16)$$

Voorbeeld: $T_2 = 4005 / (4500/90 - 250) = -22.5$ km/h

De startgolf gaat sneller dan de stopgolf en haalt hem dus in. Met simpele meetkunde kan men het snijpunt bepalen.

Op dat moment en die plaats ontstaat er een derde schokgolf, de overgang tussen vrij rijdend verkeer en de capaciteitstoestand, met snelheid T_3

$$\omega_3 = \frac{q_1 - q_c}{k_1 - k_c} = \frac{q_1 - q_c}{q_1/u_1 - q_c/u_c} \quad (17)$$

Voorbeeld: $T_3 = (3000 - 4500) / (3000/90 - 4500/90) = 90$ km/h

Als deze golf de plaats van de blokkering bereikt is de verstoring afgelopen. Dat is niet helemaal juist maar wat er benedenstrooms van de brug gebeurt is meestal van weinig betekenis ten opzichte van wat er bovenstrooms gebeurt in termen van stilstand en tijdverlies.

4.3.2 Tijdelijke overbelasting van bottle-neck

Dit verschijnsel komt in de praktijk dagelijks voor en wordt ook vaak met FOSIM bestudeerd. We zullen het hier enigszins geschematiseerd behandelen.

De parameters van de basisdiagrammen staan in Tabel 2; zie ook figuur 14.

We zullen het weggedeelte bovenstrooms van de bottleneck (b-n) aanduiden met 'wegvak-1'.

In de uitgangssituatie is de intensiteit 3000 vtg/h ('vraag' A), daarna stijgt de intensiteit sprongsgewijs naar 4000 vtg/h (vraag B) en neemt vervolgens sprongsgewijs af tot 2000 vtg/h (vraag C). Dat betekent dat in situatie A er nog net geen congestie optreedt, in situatie B ontstaat er congestie en die blijft systematisch groeien. In

situatie C wordt de con-gestie afgebroken en treedt vervolgens weer congestievrije afwikkeling op.

Op deze situatie zal de schokgolftheorie worden toegepast; zie de basisdiagrammen en de schokgolven en voertuigtrajectoriën in de figuren 14 en 15.

Tabel 2: Parameters basisdiagrammen

	Symbool	Eenheid	Ideaal wegvak	Bottle-neck
Capaciteit	q_c	vtg/h	4500	3000
Vrije snelheid	u_0	km/h	120	100
$u = u_0$ tot aan	q_{vrij}	vtg/h	3500	2000
Cap.snelheid	u_c	km/h	90	60
Cap.dichtheid	k_c	vtg/km	50	50
Stremmingsdichtheid	k_s	vtg/km	250	250

- **Vraag = 3000 vtg/h**

Deze intensiteit kan nog precies door de b-n met een snelheid van 60 km/h (toestand 1).

Op wegvak-1 bestaat de vrije toestand met $u = 120$ km/h (toestand 0).

De toestanden 0 en 1 grenzen aan elkaar bij het begin van de b-n en daar treedt een 'horizontale' schokgolf op, d.w.z. de voertuigen gaan van 120 naar 60 km/h op een vaste plaats. Men kan ook zeggen dat de schokgolf een snelheid $T_{0-1} = 0$ heeft. De aanduiding 'horizontaal' is gekozen omdat de trajectorie van de schokgolf in het weg-tijdvlak een horizontale lijn is.

Aan het einde van de b-n gaat de toestand weer van 1 naar 0, ook met een horizontale schokgolf als grens.

- **Vraag = 4000 vtg/h**

Op wegvak-1 ontstaat bovenstrooms de toestand 2 met $u = 4000/40 = 100$ km/h. De dichtheid van 40 vtg/km lezen we af uit het basisdiagram. De nieuwe toestand grenst aan toestand 0 en de overgang is een schokgolf met een positieve snelheid:

$$T_{2-0} = (4000-3000)/(40 - 3000/120) = 66.7 \text{ km/h.}$$

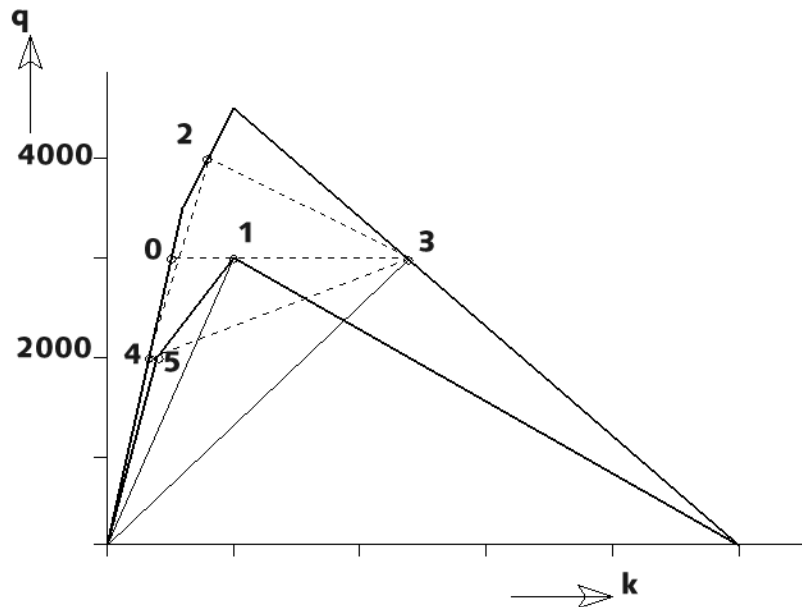
Die golf bereikt na een zekere tijd de b-n.

De intensiteit van 4000 kan niet meer door de b-n. In de b-n blijft toestand I bestaan maar bovenstrooms ontstaat toestand 3 (congestie) en begint een schokgolf met snelheid:

$$T_{2-3} = (3000-4000)/(118-40) = -12.8 \text{ km/h}$$

Bij het begin van de b-n ontstaat een schokgolf met snelheid 0 maar dat is nu de overgang van toestand 3 naar toestand 1.

Opmerking: Was het dus eerst zo dat de voertuigen bij het begin van de b-n vertraagden van 120 naar 60 km/h, nu versnellen ze 'op dezelfde plaats' van $3000/118=25.4$ km/h naar 60 km/h.



Figuur 14: Basisdiagrammen en verkeersstroomtoestanden

Figuur 15: Voertuigtrajectoriën en schokgolven

- **Vraag = 2000 vtg/h**

Op wegvak-1 zijn nu aanwezig de toestanden (volgorde vanaf bovenstrooms):
 $q=2000$ (4); $q=4000$ (2) en $q=3000$ (3).

Tussen toestand 4 en 2 loopt een schokgolf met positieve snelheid

$$T_{4,2} = (2000-4000)/(2000/120 - 40) = 85.7 \text{ km/h.}$$

Tussen 2 en 3 liep al schokgolf 2-3 met negatieve snelheid.

Na een zekere tijd ontmoeten deze schokgolven elkaar en gaan over in een schokgolf tussen toestand 4 en 3 met positieve snelheid

$$T_{4,3} = (2000-3000)/(2000/120 - 118) = 9.9 \text{ km/h.}$$

Na zekere tijd bereikt deze schokgolf de bottleneck. Daarna heerst op wegvak-1 toestand 4 en gaat de toestand in de b-n over van toestand 1 naar toestand 5.

De overgang van toestand 1 naar 5 in de b-n betekent weer een schokgolf met snelheid

$$T_{5,1} = (2000-3000)/(20-50) = 33.3 \text{ km/h.}$$

Als deze schokgolf het eind van de b-n bereikt, dan gaat benedenstrooms van de b-n een schokgolf lopen, de overgang van toestand 1 naar 4 met snelheid $T_{4,0} = 120 \text{ km/h.}$

Het hele proces wordt geïllustreerd in het weg-tijdvlak in Fig 3.9.

Opmerking Bij dit eenvoudige geval treden al 9 schokgolven op (waarvan 3 met snelheid 0) en 6 verkeersstroomtoestanden.
 (2 schokgolven zijn niet behandeld; spoor die zelf op)

5 CAPACITEITSTRECHTER EN SERIE-OPTIE

5.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk volgen enige verdere punten van aandacht die bij gebruik van FOSIM relevant zijn. Het gaat om het verschijnsel dat congestie meestal niet bij het begin van de bottle-neck ontstaat maar enige afstand benedenstrooms. Verder zullen een paar punten worden behandeld die bij het gebruik van de optie Serie voor het bepalen van de capaciteits-verdeling aan de orde komen.

5.2 CAPACITEITSTRECHTER VERKLAARD

Wie goed naar het begin van congestie bij FOSIM kijkt, zal opmerken dat de congestie vaak niet begint bij het begin van de bottle-neck maar iets meer stroomafwaarts. De congestie breidt zich vervolgens stroomopwaarts uit en het oorspronkelijke begin (voor de bestuurder het eind) verplaatst zich naar het fysieke begin van de bottle-neck.

Dit verschijnsel wordt ook wel capaciteitstrechter genoemd en is als zodanig al gemodelleerd in de zeventiger jaren in het macroscopische model FREQ.

Op basis van een microscopische beschouwing is de trechter eenvoudig te verklaren. Neem als voorbeeld een toerit. Stel de intensiteit op de rechter rijstrook heeft de waarde van 1600 vtg/h en begint de capaciteitswaarde van, stel 1800 vtg/h, te benaderen. De invoegers moeten een voldoende groot hiaat vinden. Die zijn er nog in ruime mate, althans als men het hiaat in afstand beschouwt.

Bij 1600 vtg/h is de gemiddelde volgtijd $3600/1600=2.25$ s. Stel de snelheid op 90 km/h, dan is de gemiddelde bruto volgafstand $2.25 \times 25=56$ m; dus bij een persone-nauto netto nog zeker 50 m. Dit is ruim voldoende om in te voegen, zeker als de invoeger vrijwel dezelfde snelheid heeft als de auto's op de rechter rijstrook.

Stel nu dat de invoeger het hiaat in twee gelijke stukken heeft verdeeld, dan heeft hij na het invoegen nog maar een bruto volgtijd van de helft van $2.25 = 1.12$ s over en voor de achterligger van de invoeger geldt hetzelfde. Veel bestuurders vinden een dergelijke volgtijd te klein. Ze kunnen die veranderen door van strook te wisselen maar meestal zal er op de strook waarnaar men wil wisselen niet al te veel ruimte zijn en zou daar het zelfde probleem kunnen ontstaan. Een andere manier is de snelheid iets te verlagen en zodoende de volgafstand en volgtijd wat te vergroten. Maar dit kan nu juist de congestie inleiden want de achterligger moet nu ook zijn snelheid iets verlagen. Dit kan tot een kettingreactie leiden en dan is de congestie een feit.

Is de congestie eenmaal aanwezig, dan treedt de normale toestand van elke overbel-aste bottle-neck weer in, namelijk dat de congestie voor de bestuurders voorbij is bij het begin van de bottle-neck.

De capaciteitstrechter wordt in de praktijk waargenomen en het feit dat FOSIM hetzelfde laat zien is dus een pluspunt voor het model.

5.3 CAPACITEIT BEPALEN MET DE SERIE-OPTIE VAN FOSIM

Deze mogelijkheid van FOSIM wordt veel gebruikt om de capaciteit van een bepaalde situatie te bepalen en de resultaten bieden tevens inzicht in de variaties in de capaciteit. Bij toepassing van deze optie moet de gebruiker nog diverse zaken kiezen. Daarvan zullen er in het volgende enige kort besproken worden.

a. Keuze raai waar capaciteit gemeten kan worden

Deze raai moet benedenstrooms van de bottle-neck zijn gelegen en er niet te ver vandaan liggen; zeg enige honderden meters.

b. Keuze raai waar congestie als eerste optreedt

Deze raai moet bovenstrooms van de bottle-neck zijn gelegen.

N.B. Als men echter opgeeft dat congestie wordt gesignaleerd op welke meetraai (doorsnede met detectoren) dan ook, dan is te controleren of de congestie inderdaad steeds begint op de plaats die men verwacht. Is dit niet het geval, dan is er mogelijk iets mis met de instellingen van de run of had men de situatie niet goed geanalyseerd. Het is dus zaak voldoende meetraaien op relevante doorsneden te installeren.

c. Keuze aggregatie-interval

Deze keuze is altijd een compromis tussen enerzijds: niet te klein want dan speelt het toeval een te grote rol; en anderzijds: niet te groot want dan is de uitkomst niet meer representatief voor de vrije afwikkelingscapaciteit. Er worden dan ten onrechte intensiteiten 'meegenomen' van de periode waarin de afrijcapaciteit al optreedt en/of van de periode waarin de capaciteit nog niet bereikt is.

In de praktijk treedt een zelfde dilemma op bij het bepalen van capaciteiten. Daar is een veel gebruikte waarde 15 minuten. Een simulatiemodel (ook FOSIM) is in het algemeen wat regelmatigiger dan de praktijk en derhalve ligt het compromis daar op een wat kleinere waarde, namelijk 5 minuten.

Zie Tabel 3 voor het effect van de grootte van het aggregatie-interval (Δt) op de gemiddelde capaciteit (C_{gem}), de standaardafwijking van de capaciteit (St. afw. C), de standaardfout, zowel absoluut als relatief, van de gem. capaciteit (St. fout), en het 95 % Betrouwbaarheidsinterval (B.I.) voor de gem. capaciteit.

Het betreft hier resultaten van een tweestrooks rijbaan met een toerit. De intensiteit op de toerit is constant (1000 vtg/h) en vormt een bottle-neck voor het doorgaande verkeer.

Het aantal simulatieruns is 30; de Seed is constant gehouden; het percentage vrachtverkeer is 10 %; in 2000 s neemt de intensiteit op de rechter rijstrook toe van 1000 naar 2500 vtg/h (helling is 0.75 vtg/s) en op de rechter strook van 640 naar 1600 vtg/h (helling is 0.48 vtg/s).

Tabel 3: Effect van het aggregatie-interval op de bepaalde capaciteiten

dt	C-gem	St. afw. C	St. Fout	St. Fout	95 % B.I.
min	vtg/h	vtg/h	vtg/h	%	vtg/h
1	4880	295	54	1.1	4770 ~ 4990
2	4648	303	55	1.2	4540 ~ 4760
5	4481	292	53	1.2	4370 ~ 4590
10	4279	317	58	1.4	4160 ~ 4400

De tabel toont duidelijk dat de gemiddelde capaciteit daalt met het aggregatie-interval dt . De St. afw varieert weinig en dus de St. Fout ($1/30$ maal zo groot) evenmin.

d. Keuze groei van verkeersbelasting

Ook de keuze van de groei is een compromis. Kiest men de groei, uitgedrukt in de helling van intensiteit bij de ingangen, $q_{in}(t)$, te groot, dan zal het begin van de congestie vrijwel steeds in hetzelfde interval plaats vinden en vermoedelijk de hoogste intensiteit benedenstrooms van de b-n niet voldoende representatief zijn. Kiest men de groei daarentegen te klein, dan zullen de runs nodeloos veel rekentijd kosten.

Een gefundeerde aanbeveling over de keuze is nog niet te geven. Wel lijkt het goed de tabel-output van de Serie-optie te inspecteren of er wel variatie bestaat in de tijd dat de congestie wordt gesignaleerd (eerste kolom 'Tijd') en de tijd waarop de capaciteitswaarde wordt bepaald (tweede kolom 'Tijd'). Als daar vrijwel geen variatie in optreedt, is de groei vermoedelijk te groot gekozen.

e. Keuze aantal runs per case

Opnieuw is de waarde een compromis. Kiest men de waarde te klein, dan is het resultaat te veel afhankelijk van toeval. Kiest men een te groot aantal, dan verbruikt men nodeloos veel rekentijd en heeft men meer uitkomsten te inspecteren.

In de handleiding FOSIM staat al een recept voor het bepalen van het aantal runs teneinde een gewenste marge en een gewenste betrouwbaarheid te verkrijgen. Hier wordt nog eens de 'Wortelregel der statistiek' onder de aandacht gebracht.

In vrijwel alle gevallen geldt dat de variatie van gemiddelde van uitkomsten van een toevalsproces (uitgedrukt in de standaardfout) afneemt met de wortel van het aantal uitkomsten, in dit geval het aantal simulatieruns.

De wortelregel stemt enerzijds pessimistisch: met tweemaal zoveel runs is men maar 41, afgerond 40 %, beter af; anderzijds optimistisch: met de helft van het aantal runs is men maar 29, afgerond 30 %, slechter af.

f. Praktisch recept

N.B. Zoals bij ieder recept moet men het niet blindelings toepassen maar blijven opletten.

Kies het aantal runs niet kleiner dan 30 (dit heeft het voordeel dat men voor het te bepalen betrouwbaarheidsinterval geen t-verdeling nodig heeft).

De resultaten van de Serie-optie zijn een gemiddelde capaciteit, C_{gem} , en een standaardafwijking, s_{cap} .

De standaardfout van de gemiddelde capaciteit is dan: $s_{\text{cap}} / \sqrt{N}$

Een 95 % betrouwbaarheidsinterval voor de gemiddelde capaciteit wordt:

$$C_{\text{gem}} \pm 2 s_{\text{cap}} / \sqrt{N}$$

Tenslotte is het aan te bevelen de capaciteitsverdeling te inspecteren op uitschieters. Dit moeten er niet te veel zijn. Is dit wel het geval dan heeft men wellicht te maken met een hele kritische situatie waarbij het optreden van congestie sterk fluctueert naar plaats en tijd. Heroverweging van het ontwerp is dan geboden.

Opm. Dit recept is toegepast bij de simulatieruns t.b.v. Tabel 3.

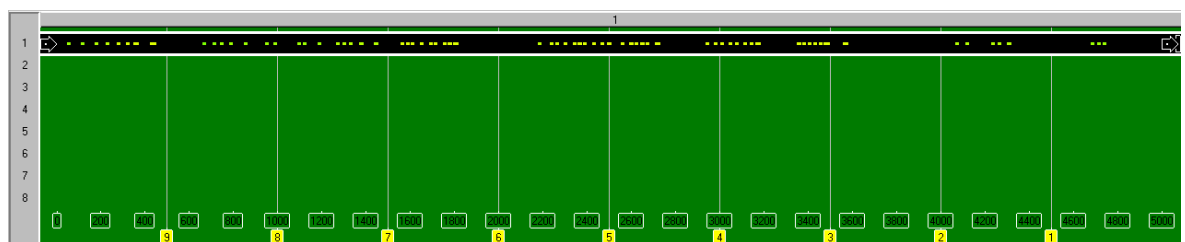
6 DE WERKING VAN FOSIM VERKLAARD

FOSIM bootst het gedrag van individuele verkeersdeelnemers na. De gegeven invoer (schematisatie van weg en verkeer) bepaalt dan ook ten eerste hoe bestuurders in FOSIM handelen. De handelingen van alle bestuurders samen leiden vervolgens tot een bepaalde verkeersafwikkeling. Om te begrijpen waarom de invoer tot een bepaald resultaat leidt, moet men dan ook inzicht hebben in twee verbanden: de manier waarop de invoer het bestuurdersgedrag beïnvloedt en vervolgens de manier waarop de het bestuurdersgedrag de verkeersafwikkeling bepaalt. Dit hoofdstuk behandelt dan ook beide. Het doet dit door per paragraaf een andere in FOSIM gesimuleerde wegconfiguratie te beschouwen, waarbij de complexiteit van de situatie steeds verder toeneemt.

6.1 EEN ENKELSTROOKS RIJBAAN ZONDER DISCONTINUÏTEITEN

De eenvoudigste wegconfiguratie is de enkelstrooks rijbaan zonder discontinuïteiten, ofwel, zonder veranderingen in de geometrie (invoegingen, krappe bogen, hellingen, etcetera) of regelgeving die van invloed zijn op de verkeersafwikkeling. In FOSIM ziet dit eruit als een enkele fysieke sectie met aan het begin een herkomst en aan het eind een bestemming (zie figuur 16). Hiermee is de invoer van het 'wegontwerp' volledig.

Ook de schematisatie van het verkeer is eenvoudig. Omdat er slechts één herkomst en één bestemming is, valt er niets te specificeren wat betreft het Herkomst-Bestemmings-patroon (HB-matrix). Verder is ook de invoer van de voertuigverdeling niet ingewikkeld. Uitgangspunt is hierbij altijd dat het percentage vrachtverkeer over de gehele rijbaan bekend is. Aangezien er twee voertuigtypen zijn die het vrachtverkeer representeren, moet dit vrachtverkeer in gelijke aandelen over deze typen verdeeld worden. Al het overige verkeer bestaat uit personenauto's, ofwel, in FOSIM voertuigtypen 1 tot en met 3. Het personenautoverkeer moet in gelijke aandelen over deze typen verdeeld worden. In het geval van 10% vrachtverkeer, waar in dit hoofdstuk telkens vanuit gegaan wordt, betekent dit dat de herkomst 30% voertuigtype 1, 30% voertuigtype 2 en 30% voertuigtype 3 moet aanmaken en 5% voertuigtype 4 en 5% voertuigtype 5. De invoer moet tenslotte ook specificeren hoeveel verkeer de simulator moet genereren. Welke overwegingen hierbij spelen, volgt iets verderop.



Figuur 16: Een enkelstrooks rijbaan zonder discontinuïteiten

Bij het starten van de simulatie vertaalt FOSIM eerst de gegeven invoer naar een formaat dat de simulator begrijpt. Dit komt erop neer dat alle onderdelen van de

weg vertaald worden tot bepaalde 'objecten' en dat voor sommige objecten enige kenmerken vastgelegd worden. Indien gewenst kunnen de objecten bekeken worden in 'objectenlijst' uit het uitvoermenu.

Het aanmaken van alle interne objecten gebeurt natuurlijk slechts één keer gedurende de simulatie. In het vervolg houdt het model zich bezig met het nabootsen van het gedrag van de verkeersdeelnemers. De basisgedachte hierbij is dat de tijd opgedeeld is in kleine intervallen van een vaste lengte, de tijdstap (in FOSIM 0,5 s). Er wordt aangenomen dat bij de overgang van de ene naar de andere tijdstap bestuurders hun beslissingen nemen en dat zij gedurende de lengte van de tijdstap deze niet veranderen. Intern komt dit erop neer dat FOSIM iedere tijdstap in stroomopwaartse richting alle voertuigen¹ op de weg naloopt, voor elk voertuig bepaalt wat deze de komende tijdstap wil doen en dit vervolgens uitvoert voor de komende tijdstap (zie paragraaf 6.1.2). Wanneer FOSIM bovendien bij het nalopen van de voertuigen een herkomst (ook wel bron of generator genoemd) tegen komt, wordt gekeken of het een nieuw voertuig op de weg moet zetten (zie paragraaf 6.1.1).

6.1.1 *Het genereren van voertuigen*

Aan het begin van de simulatie zijn uiteraard nog geen voertuigen op de weg aanwezig, zodat in het beschouwde voorbeeld FOSIM de eerste tijdstap alleen moet controleren of in de huidige tijdstap herkomst 1 verkeer moet aanmaken. Dit gebeurt door aan de hand van de opgegeven intensiteit te schatten op welke afstand voertuigen *gemiddeld* van elkaar moeten rijden². Vervolgens vergelijkt FOSIM deze afstand met de afstand tot het eerstvolgende voertuig stroomafwaarts van de herkomst (op de strook van de herkomst). Indien de aanwezige ruimte groot genoeg blijkt, wordt daadwerkelijk een voertuig geplaatst. FOSIM loot om welk voertuigtype het moet gaan en loot eveneens de bestemming van het voertuig. Dit voertuig wordt vervolgens op de berekende gemiddelde volgafstand van de leider geplaatst, met een snelheid die aangepast is aan de snelheid van de leider.

Vanwege deze methode is het noodzakelijk dat het begin van het wegvak enkelstrooks is. Immers, het model kijkt telkens of het een nieuw voertuig moet aanmaken op basis van de afstand tot het laatst aangemaakte voertuig. Het kijkt hiertoe echter alleen naar de strook waar de herkomst zich op bevindt. Wanneer nu een voertuig van strook kan wisselen voordat het volgende voertuig aangemaakt moet worden, neemt de herkomst dat voertuig niet meer waar en kan de herkomst te veel voertuigen genereren.

Het is ook mogelijk dat de herkomst minder voertuigen aanmaakt dan opgegeven in de invoer. Hiervoor zijn twee mogelijke redenen:

- een file bereikt de bron. Door de lage snelheden bij de bron duurt het dan langer voordat de benodigde ruimte om het volgende voertuig te plaatsen beschikbaar is, zodat mogelijk de vraagintensiteit niet gehaald kan worden,

¹ Eigenlijk loopt FOSIM alle objecten na. Voertuigen zijn ook objecten.

² Er wordt in feite uitgegaan van een uniforme opvolgtijdverdeling.

- de gevraagde intensiteit is te hoog. Bij een zeer hoge intensiteit plaatst FOSIM de voertuigen op een corresponderende korte afstand van elkaar, waarbij de snelheid van het nieuwe voertuig overigens aangepast is aan de snelheid van het eerder geplaatste voertuig. Deze zeer korte volgafstanden zijn echter niet acceptabel bij de gereden snelheden (door de kleur van de voertuigen de 'volgtoestand' te laten weergeven wordt dit zichtbaar). De snelheden moeten dan ook dalen tot lage waarden. Omdat voertuigen dan langzamer van de herkomst weggrijden, duurt het langer voordat voldoende ruimte beschikbaar is om het volgende voertuig te plaatsen en kan de vraagintensiteit niet gehaald worden. Deze verklaring geeft ook aan hoe de maximale intensiteit die een herkomst kan aanmaken samenhangt met de voertuigtypedistributie. Voertuigtype 2 wenst namelijk een grotere volgafstand dan type 1, type 3 groter dan type 2, enzovoort. Van voertuigtype 1 kunnen dus meer voertuigen op een korte afstand van elkaar geplaatst worden zonder dat dit problemen oplevert dan van bijvoorbeeld type 4. Voor het praktische gebruik betekent dit, zoals te verwachten is, dat bij een groter percentage vrachtverkeer een kleinere intensiteit kan worden aangemaakt dan bij een kleiner percentage.

Door de gevolgde manier waarop het model de voertuigen plaatst, kan aan het begin van het wegvak de opvolgtijdverdeling onrealistisch zijn: er is onvoldoende spreiding. Na enige weglengte zal dit bezwaar echter opgeheven zijn door de verschillende snelheden van de aangemaakte voertuigen. Men moet dan ook in elke simulatie enige weglengte stroomopwaarts van het te bestuderen wegelement plaatsen.

Zoals genoemd loot het model bij het aanmaken van een voertuig welk type dit moet zijn en naar welke bestemming hij moet gaan³. Dit is één van de weinige plaatsen in het model waar loting plaatsvindt, zodat deze lotingen voor een zeer belangrijke deel verantwoordelijk zijn voor het toevalselement in FOSIM. Het is opvallend dit tot een behoorlijke variatie in simulatieresultaten leidt.

6.1.2 *Het handelen van de bestuurders*

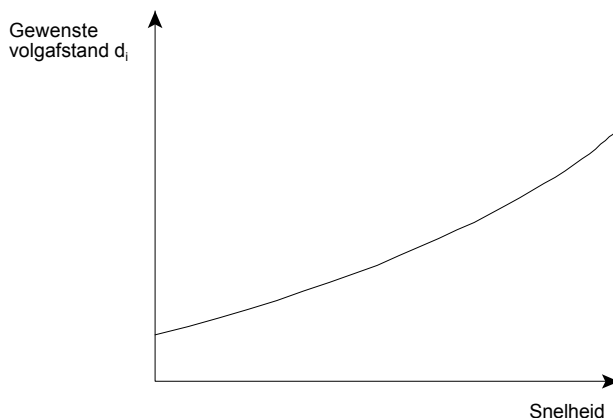
Wanneer eenmaal voertuigen op de weg geplaatst zijn, moet FOSIM elke tijdstap bepalen wat deze voertuigen willen doen. In het geval van het allereerste voertuig is dit zeer eenvoudig: dit voertuig hoeft geen rekening te houden met ander verkeer, zodat het de weg kan vervolgen met de wenssnelheid. Dit geldt uiteraard voor alle 'vrije' voertuigen: of de wenssnelheid kan gehandhaafd worden of er kan geaccelereerd worden naar de wenssnelheid. Voor deze acceleratie neemt het model een waarde die afneemt met de toenemende voertuigsnelheid. Omdat het hier bovendien gaat om een enkele strook, hoeft het model in dit geval niet te kijken of er van strook gewisseld moet worden.

De volgende voertuigen hebben echter allemaal een voertuig voor zich op dezelfde strook (het gaat immers om een enkele strook), in het vervolg een leider genoemd. Het model zal nu telkens bepalen hoe elk voertuig moet reageren op zijn leider. Dit

³ Dit gebeurt uiteraard aan de hand van de opgegeven voertuigverdeling en HB-matrix. Bovendien is de loting afhankelijk van de startwaarde van de randomgenerator: bij dezelfde startwaarde loot het model altijd hetzelfde, zodat de uitkomsten reproduceerbaar zijn.

gebeurt op basis van twee principes: bestuurders proberen hun leiders op een bepaalde afstand te volgen en bestuurders willen ongelukken voorkomen.

Uitgangspunt voor het eerste principe is dat bestuurders wanneer zij een voertuig niet kunnen passeren en dus dit voertuig enige tijd moeten volgen, een bepaalde afstand tot het leidende voertuig willen aanhouden. FOSIM gaat ervan uit dat deze gewenste volgafstand een functie is van de snelheid (zoals geschetst in figuur 17). FOSIM rekent voor elk voertuig telkens uit welke versnelling nodig is om deze gewenste volgafstand te bereiken.



Figuur 17: Aangenomen verband tussen snelheid en gewenste volgafstand

De berekening van de benodigde versnelling gebeurt op twee manieren. De eerste is van belang wanneer een voertuig een trager voertuig nadert (overgang van vrij rijden naar volgen). FOSIM houdt hierbij expliciet rekening met de beperkingen van de menselijke waarneming. Bestuurders zijn namelijk beter in staat het snelheidsverschil met het voorliggende voertuig te bepalen wanneer de afstand tussen de voertuigen kleiner is. Het komt er in het model op neer dat een bestuurder alleen op een tragere leider reageert wanneer het snelheidsverschil voldoende groot is in relatie tot de actuele opvolgafstand. Indien een bestuurder moet reageren, volgt uit dit waarnemingsmodel bovendien de mate waarin het voertuig moet afremmen.

Bij de tweede methode is het uitgangspunt dat bestuurders een bepaalde tijd in de toekomst kijken, de zogenaamde anticipatietijd⁴, en dat bestuurders na deze anticipatietijd hun gewenste volgafstand willen bereiken. FOSIM berekent de hiervoor benodigde versnelling. Deze berekening wordt altijd uitgevoerd, dus niet alleen bij het naderen van een trager voertuig, maar ook wanneer de snelheid van de leider groter is dan van het eigen voertuig. De resulterende versnelling kan dan ook zowel positief als negatief zijn. Op deze manier zorgt het model ervoor dat als een bestuurder eenmaal aan het volgen is de afstand tot zijn leider goed rond de gewenste volgafstand blijft.

FOSIM kiest uiteindelijk de kleinste (dit wil dus ook zeggen, de meest negatieve) van de met de twee methoden berekende versnellingen. Dat wil echter nog niet zeggen dat het berekende resultaat ook echt toegepast wordt. De versnelling wegens volgen

⁴ Deze bedraagt in het model 2 of 4 s.

wordt namelijk ook nog begrensd op de ‘maximale volgdeceleratie’⁵, waardoor bestuurders modelmatig alleen gas los laten (op de motor remmen). Dit alles wil in het kort zeggen: wanneer een bestuurder een voertuig onder normale omstandigheden nadert, wil hij hier niet fors maar geleidelijk voor afremmen.

Het is echter mogelijk dat bestuurders sterker moet afremmen. Dan ligt de nadruk niet op het comfortabel volgen van een ander voertuig, maar eerder op het voorkomen van een aanrijding. Ook hier is het uitgangspunt dat het voertuig na de anticipatietijd op een bepaalde afstand van zijn leider wil zijn. In dit geval is deze afstand echter niet de gewenste volgafstand bij de huidige snelheid, maar een kleine afstand⁶, dus een afstand waarbij een ongeluk net voorkomen wordt. Het model begrenst de toegelaten versnelling nu bovendien niet tot een bepaalde comfortabele waarde, zoals in feite bij het normale volgen gebeurt, maar tot de ‘maximale deceleratie’. Indien noodzakelijk staat het model dus zeer sterke deceleraties toe.

Uiteindelijk moet voor elk voertuig gekozen worden tussen de versnelling die benodigd is voor het volgen op de wensafstand en de versnelling die benodigd is om aanrijdingen te voorkomen. FOSIM kiest uiteraard altijd de maatgevende, dat wil zeggen de kleinste. Wanneer het gaat om decelereren is dit de zwaarste deceleratie, terwijl in het geval van accelereren het model de kleinste acceleratie kiest. Overigens beperkt FOSIM ook de mogelijke acceleratie, net als de mogelijke deceleratie. Deze mogelijke acceleratie is afhankelijk van de huidige snelheid van het voertuig: bij lage snelheden kan een voertuig sneller optrekken dan bij hoge snelheden. Nadat indien noodzakelijk FOSIM nog enige reactietijd in rekening gebracht heeft, kan tenslotte het beschouwde voertuig verzet worden naar zijn nieuwe positie.

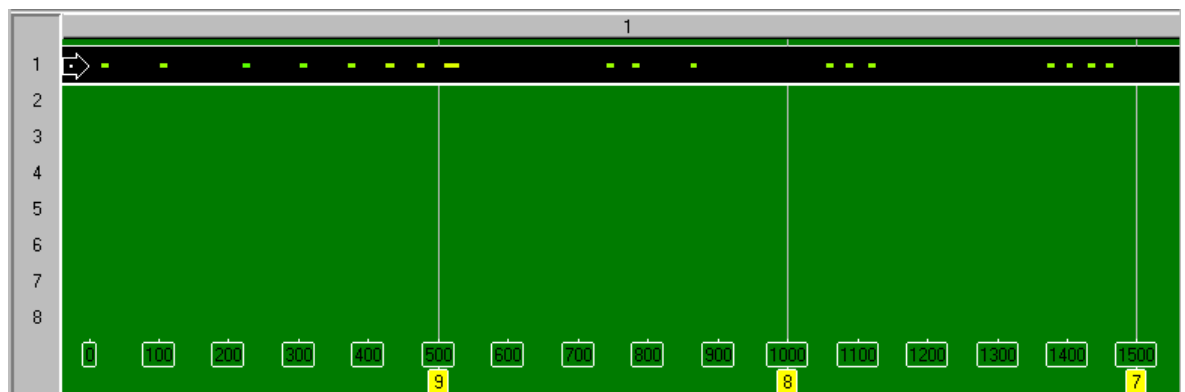
6.1.3 *De resulterende verkeersafwikkeling*

In tegenstelling tot de toch wel enigszins complexe interne werking van het model is de verkeersafwikkeling in de simulatie eenvoudig. De herkomst maakt verkeer aan zoals opgegeven in de invoer. Bij niet te hoge intensiteiten zijn de afstanden tussen de voertuigen aan het begin van het wegvak nog behoorlijk (zie figuur 18). Echter, een deel van het verkeer (namelijk vrachtverkeer van type 5) heeft een aanmerkelijk lagere wenssnelheid dan het overige verkeer. Alle snellere voertuigen naderen dan ook deze vrachtwagens die ze vervolgens moeten gaan volgen waarbij ze proberen hun gewenste volgafstand aan te houden⁷. Hierdoor passeren telkens na enige weglengte alleen nog lange colonnes waarin alle voertuigen ongeveer dezelfde snelheid hebben, geleid door vrachtwagens van type 5 (zie figuur 19). De afstanden tussen deze colonnes kunnen behoorlijk zijn als de intensiteit niet te groot is. Bovendien naderen de colonnes elkaar niet doordat binnen een voertuig-bestuurdercombinatie de wenssnelheid constant is. Ofwel, alle vrachtwagens van type 5 voeren de colonnes met dezelfde snelheid aan.

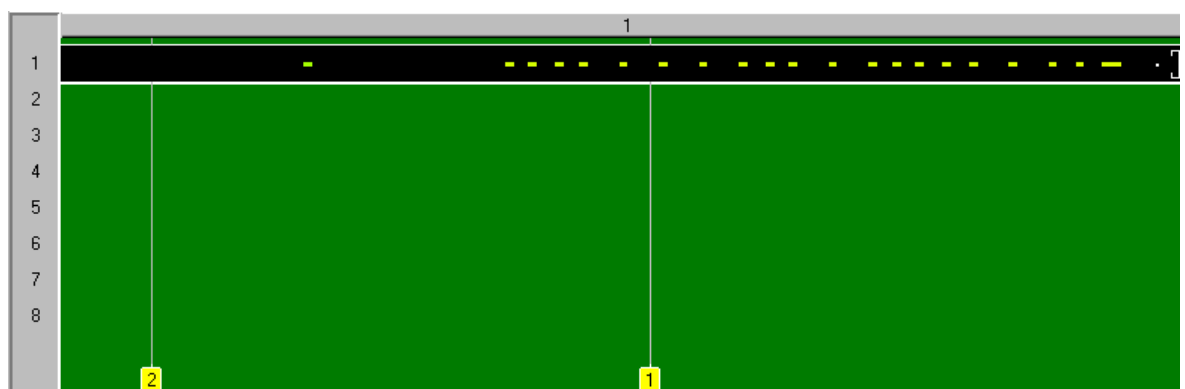
⁵ Zie het scherm ‘voertuigparameters’ van het menu ‘verkeer’.

⁶ Namelijk de gewenste afstand bij stilstand.

⁷ Bekijk eens het volgproces door de legenda (‘kleur geeft aan’) van de voertuigen te veranderen of door de kenmerken van de voertuigen te bekijken (aanklikken van een voertuig).



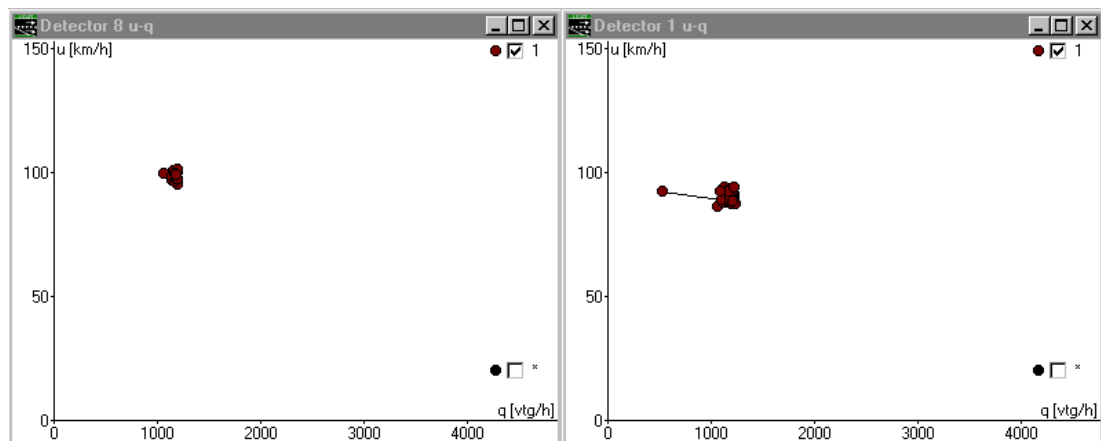
Figuur 18: Aan het begin van het wegvak zijn er nog vrij rijdende voertuigen



Figuur 19: Aan het eind van het wegvak rijden bijna alle voertuigen in een colonne

De resultaten op macroscopisch niveau passen uiteraard bij dit beeld op voertuigniveau. Omdat aan het begin van de weg minder voertuigen in een colonne rijden ligt de verkeerssnelheid daar hoger dan verder stroomafwaarts waar de snelheid van het verkeer praktisch gelijk is aan de traagste voertuigen (zie figuur 20). Voor het basisdiagram in deze figuur maakt de herkomst overigens constant 1200 vtg/h aan. De stroomafwaartse detector registreert in eerste instantie echter minder verkeer. Dit komt doordat pas na enige tijd het verkeer het einde van het wegvak bereikt en dus de eerste meetperiode hier minder voertuigen waargenomen worden.

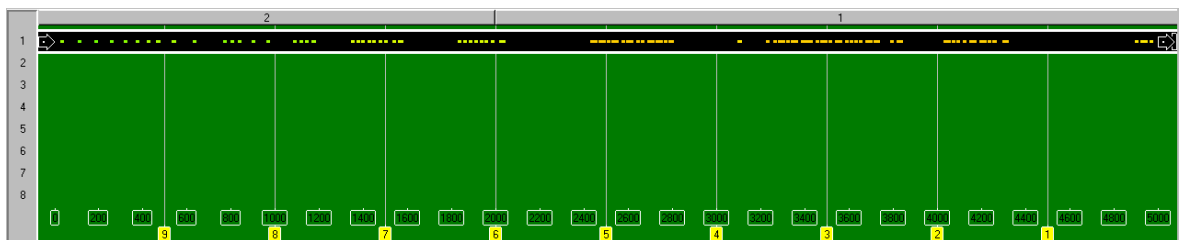
Omdat het hier gaat om een wegvak zonder discontinuïteiten kan er geen file ontstaan. Er kan immers alleen file ontstaan als een bepaald deel van de weg meer verkeer kan aanbieden dan een hierop volgend deel kan verwerken, ofwel, als de stroomafwaartse capaciteit kleiner is dan de stroomopwaartse. In dit geval is de weg echter overal hetzelfde (continu) en kan elk deel dus evenveel verkeer verwerken. Als het begin van de weg het verkeersaanbod aan kan, kan de rest van de weg dit ook wel.



Figuur 20: Basisdiagrammen (snelheid - intensiteit) voor een doorsnede net na de herkomst (8) en een doorsnede net voor de bestemming (1)

6.2 EEN ENKELSTROOKS RIJBAAN MET SNELHEIDSONDERDRUKKING

Deze paragraaf beschrijft de simulatie van een wegvak dat bijna identiek is aan het vorige voorbeeld. Het gaat opnieuw om een enkelstrooks rijbaan zodat strookwisselingen opnieuw niet relevant zijn. De enige verandering is dat op een deel van de weg de snelheid beperkt is. In de schematisatie is dit een kleine wijziging: toevoegen van de een fysieke sectiegrens (zie figuur 21) en voor de stroomafwaartse sectie het percentage van de snelheidsonderdrukking opgeven (voor de sectie 2 geldt geen snelheidsonderdrukking).



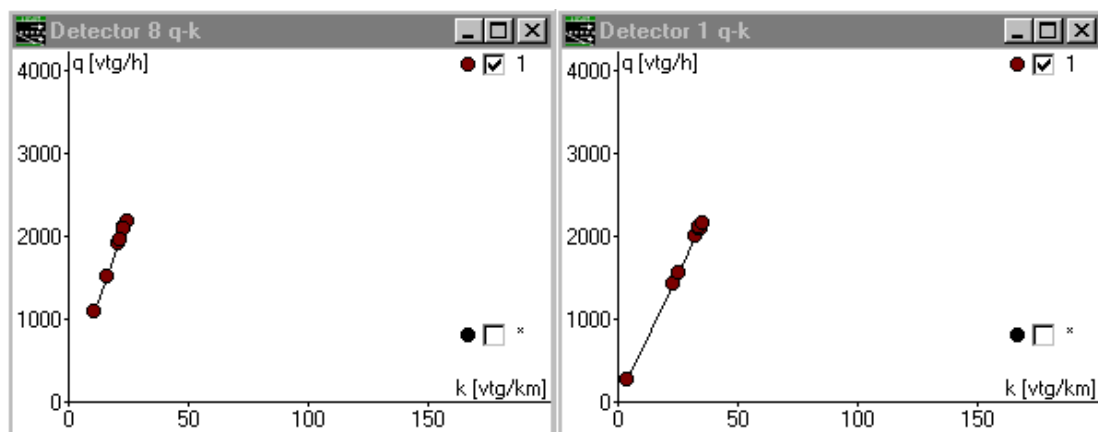
Figuur 21: Een enkelstrooks rijbaan met deels snelheidsonderdrukking

Ook intern in het model gaat om een beperkt verschil ten opzichte van het wegvak van paragraaf 2.1. Het verschil bestaat eruit dat wanneer een voertuig de sectie met snelheidsonderdrukking bereikt, FOSIM de gewone wenssnelheid (zie opnieuw 'voertuigparameters' van het verkeersmenu) verlaagt door deze te vermenigvuldigen met het opgegeven percentage voor de snelheidsonderdrukking. Met de standaard-wenssnelheden en een snelheidsonderdrukking van 70% betekent dit dat de verlaagde wenssnelheid van het snelste voertuigtype (type 1) gelijk is aan $0,70 \cdot 125 = 87,5$ km/h, terwijl het traagste voertuigtype (type 5) nog maar een wenssnelheid van $0,7 \cdot 85 = 59,5$ km/h heeft.

Wanneer een voertuig een hogere snelheid heeft dan de aangepaste wenssnelheid, zorgt het model ervoor dat het voertuig moet afremmen. Hierbij is het uitgangspunt dat bestuurders niet bereid zijn het rempedaal te gebruiken, maar dat zij alleen het

gas laten⁸. In FOSIM-termen betekent dit: voertuigen vertragen met de maximale volgdeceleratie⁹. Een verder gevolg van de lagere wensnelheid is dat het model de beschikbare acceleratie beperkt.

Voor de simulatieresultaten kunnen de gevolgen van de kleine verandering echter groot zijn. Het wegvak is nu immers niet meer continu: de snelheidsonderdrukking in sectie 2 zorgt voor een andere afwikkeling dan in sectie 1, zoals de basisdiagrammen in figuur 22 weergegeven. Maar ondanks de lagere snelheid ontstaat er ook bij hoge belastingen geen file. Blijkbaar is de capaciteit van sectie 1 nog niet (of slechts zeer weinig) kleiner dan van sectie 2.



Figuur 22: Basisdiagrammen (dichtheid - intensiteit) voor een doorsnede net na de herkomst (8, geen snelheidsonderdrukking) en een herkomst net voor de bestemming (1, snelheidsonderdrukking 70%)

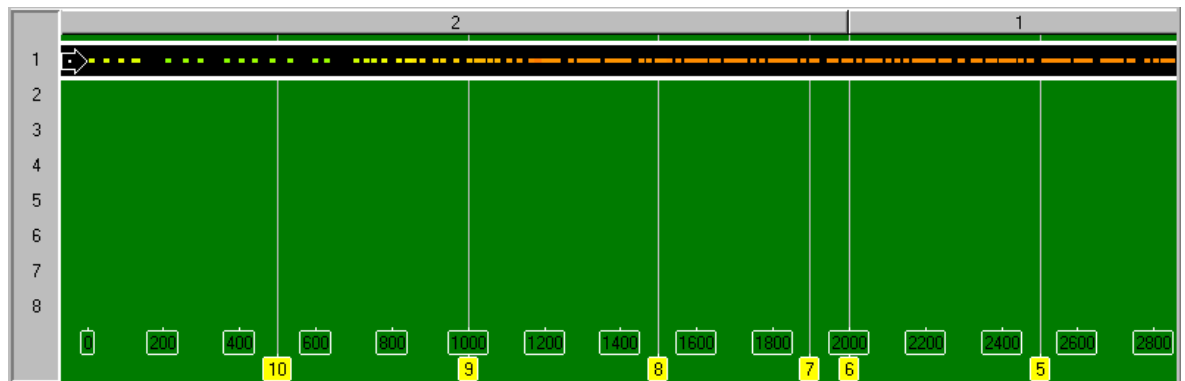
Bij verdere verlaging van de snelheid is het echter wel mogelijk file te laten ontstaan. Bij een snelheidsonderdrukkingsfactor van 50% beweegt een schokgolf zich langzaam tegen het verkeer in waardoor de snelheden al ver voor sectie 1 laag worden (zie figuur 23). Verder laat ook het basisdiagram zien dat er file is: stroomopwaarts van sectie 1 bevindt een deel van de meetresultaten zich in het congestieve deel van het basisdiagram (zie figuur 24).

Het ontstaan van de file is op voertuigniveau als volgt te beschrijven. Bij hoge intensiteit komen er praktisch geen vrij rijdende voertuigen meer voor maar rijdt iedereen ongeveer op zijn gewenste volgafstand van zijn leider. Wanneer bestuurders de sectie met de snelheidsonderdrukking bereiken, moeten ze hun snelheid verlagen. Bij deze lagere snelheid hoort ook een kleinere gewenste volgafstand. De snelheid en de hierbij horende gewenste volgafstand bepalen samen de gewenste volgtijd tussen twee voertuigen. De gewenste volgtijd heeft vervolgens een vrij duidelijk verband met de (in de theorie) maximaal haalbare intensiteit: hoe kleiner de gewenste volgtijden, hoe groter deze is. Nu wordt bij afnemende snelheid de gewenste volgaf-

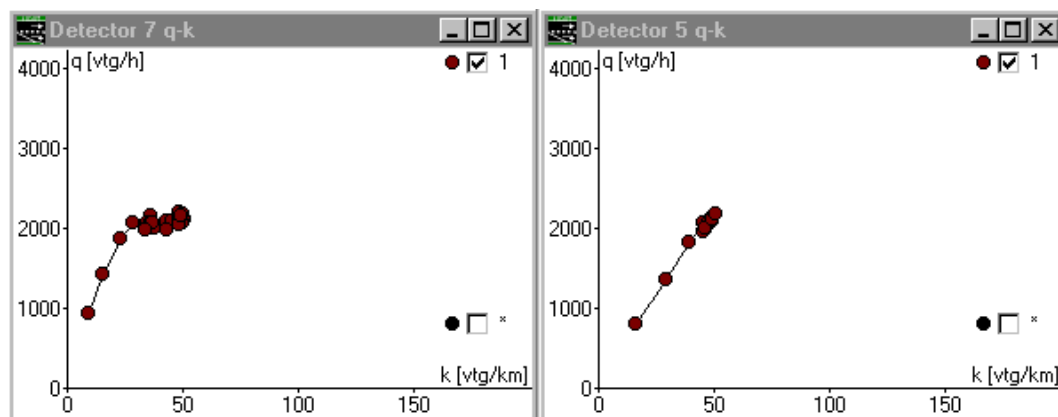
⁸ Men kan zich voorstellen dat iets dergelijks ook in werkelijkheid gebeurt wanneer op de snelheidslimiet van 120 km/h naar 100 km/h gaat of wanneer een werkvak begint. Voor het afremmen vanwege bijvoorbeeld bochten is dit echter niet reëel.

⁹ Sterker remmen is uiteraard toegestaan wanneer geremd moet worden voor ander verkeer.

stand wel kleiner, maar niet voldoende om de volgtijden niet te laten toenemen. Omdat met afnemende snelheid de gewenste volgtijd toeneemt, neemt de haalbare intensiteit af. Dit effect wordt pas bij vrij lage snelheden van betekenis. Dit verklaart dat pas bij een behoorlijke snelheidsonderdrukking de capaciteit van sectie 1 afneemt.



Figuur 23: File door toepassing van snelheidsonderdrukking



Figuur 24: Basisdiagrammen (intensiteit - dichtheid) voor een doorsnede net stroomopwaarts (7) en stroomafwaarts (5) van de sectie met snelheidsonderdrukking (50%)

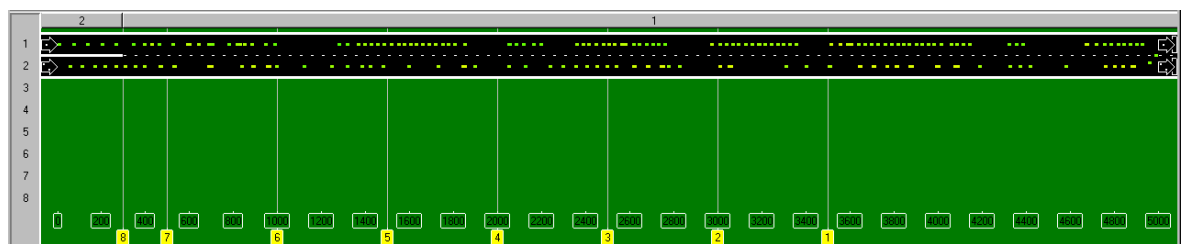
In de file kunnen zeer lage snelheden voorkomen, tot stilstand toe. In dat geval hebben vrachtwagens moeite weer snelheid te maken. Hierdoor ontstaat stroomafwaarts van de vrachtwagen nogal eens een behoorlijk groot hiaat. Wanneer dit hiaat blijft bestaan, leidt dit tot een afname van de capaciteit. Daarom wordt vaak onderscheid gemaakt tussen de 'capaciteit', dat wil zeggen de maximale intensiteit die bereikt kan worden vanuit niet-congestieve afwikkeling, en de 'afrij-intensiteit', ofwel de hoeveelheid verkeer die de weg tijdens congestie kan verwerken. De capaciteit is dus nogal eens enigszins hoger dan de afrij-intensiteit. FOSIM is vooral gericht op het bepalen van de capaciteit.

6.3 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN ZONDER DISCONTINUÏTEITEN

Het schematiseren van een tweestrooks rijbaan (zie figuur 25) is vergeleken met een enkelstrooks rijbaan niet veel moeilijker. Een extra strook is met een paar muisklikken te plaatsen. Het belangrijkste verschil heeft te maken met het genereren van het

verkeer. Ten eerste moet het begin van het wegvak altijd uit enkele stroken bestaan, zoals al verklaard werd in paragraaf 2.1 (in de handleiding staat welke lengte deze enkele stroken minimaal moeten hebben). Daarnaast is enige aandacht nodig voor het intensiteitenverloop en de voertuigtypedistributie. De uitgangspunten zijn echter wel hetzelfde als voorheen: bepaal de hoeveelheid te genereren verkeer, bepaal met het percentage vrachtverkeer hoeveel voertuigen hiervan vrachtwagens zijn, verdeel deze vrachtwagens in gelijke mate over voertuigtype 4 en 5 en verdeel de rest van de intensiteit in gelijke mate over de typen 1 tot en met 3. Plaats vervolgens de langzamer voertuigtypen zo veel mogelijk op de rechter strook en het snellere verkeer op de linker strook. Wanneer de intensiteiten in de tijd niet constant zijn, moet ervoor gezorgd worden dat de in verhouding de intensiteiten op de stroken wel gelijk blijven. Anders verandert immers ook de voertuigtypedistributie. Wanneer bij het aanmaken van de voertuigdistributedie dus uitgegaan is van 1000 vtg/h rechts en 2000 vtg/h links moet de verhouding tussen de intensiteit rechts en links de gehele simulatie 1:2 blijven.

Nu er twee stroken zijn, is de mogelijkheid ontstaan te kiezen tussen twee bestemmingen in de herkomst-bestemmingsmatrix. Hier maakt het echter niet uit of het verkeer naar bestemming 1 of 2 gaat: de bestemmingen bevinden zich op dezelfde rijbaan.



Figuur 25: Een tweestrooks rijbaan zonder discontinuïteiten

Intern zijn de gevolgen van de extra strook extra wel aanzienlijk: er zal interactie tussen de stroken ontstaan. De meest voor de hand liggende verandering is dat het voor voertuigen mogelijk is geworden van strook te wisselen. Er zijn echter ook enige gevolgen voor het volgen.

Op een enkele strook gaat het bij het volgggedrag alleen om voertuigen op de eigen strook. Op een meerstrooks weg kunnen echter voertuigen op andere stroken ook invloed hebben. Ten eerste is het bij normale afwikkeling in Nederland niet toegestaan rechts in te halen. Wanneer de snelheden links lager zijn dan rechts proberen in FOSIM daarom bestuurders het snelheidsverschil met de linker strook te beperken door gas los te laten. Het is verder te verwachten dat wanneer zich op een rechter strook een file bevindt bestuurders het niet prettig vinden deze met al te hoge snelheden te passeren. Wanneer zich rechts dus een langzaam voertuig bevindt, proberen voertuigen in de strook hier links naast op dezelfde manier het snelheidsverschil te beperken.

In het geval van strookwisselingen kijkt het model altijd of een voertuig van strook zou willen wisselen en vervolgens of deze strookwisseling niet te risicovol is. In het geval van een wegvak zonder discontinuïteiten vinden strookwisselingen plaats omdat bestuurders op deze wijze tragere voertuigen kunnen passeren. Bestuurders

zullen hierbij echter niet te veel risico willen nemen, tenzij ze al te zeer opgehouden worden.

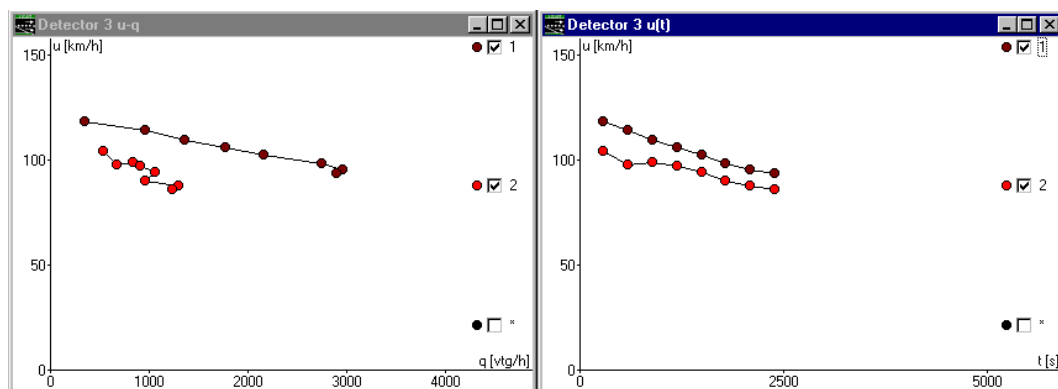
De wens om naar links te wisselen komt in grote lijnen tot stand wanneer een voertuig te maken krijgt met een tragere voorligger en hij er voordeel bij heeft naar de linker strook te gaan. De wens om naar rechts te gaan ontstaat zodra een bestuurder zijn wensnelheid weer benadert of in ieder geval weer maximaal kan accelereren. Hij moet uiteraard vervolgens niet op de rechter strook weer gehinderd worden door trager verkeer.

De wens tot strookwisselen leidt niet altijd tot het daadwerkelijk uitvoeren van een strookwisseling. Het voertuig krijgt immers te maken met een nieuwe leider en volger op de bestemmingsstrook. Het is mogelijk dat de bestuurder moet remmen voor zijn nieuwe leider, maar het is ook mogelijk dat zijn nieuwe volger moet remmen. FOSIM kijkt, op dezelfde wijze als in het volgproces gebeurt, welke versnellingen nodig zijn om een aanrijding te voorkomen, zowel voor het voertuig zelf om zijn nieuwe leider te ontwijken als voor de nieuwe volger. Bovendien kijkt het model ook welke versnelling het voertuig nodig heeft vanwege zijn gewenste volgafstand ten opzichte van de nieuwe leider. Het model laat de strookwisseling vervolgens alleen toe indien noch het voertuig, noch zijn nieuwe voertuig te hard moet remmen. Welke remvertraging nog acceptabel hangt af van de actuele snelheid van het voertuig: hoe lager de snelheid, hoe harder een bestuurder bereid is te remmen. De maximale deceleratie is hierbij de maximale strookwisseldeceleratie¹⁰. Indien de acceleratie toelaatbaar blijkt, verplaatst FOSIM het voertuig naar de gewenste strook.

Wanneer een voertuig een strook naar links wilde wisselen, maar dit niet mogelijk bleek, kijkt FOSIM of het in plaats hiervan niet zinvol is om naar rechts te wisselen (als dit mogelijk is). Opnieuw kijkt het model of het mogelijk is de strookwisseling uit te voeren zonder te sterk te moeten afremmen.

Op het tweestrooks wegvak komt het beschreven keuzeprocess van het strookwisselen vooral naar voren bij niet al te hoge intensiteiten. Dan is er immers nog zo veel ruimte dat snellere bestuurders geregeld terug gaan naar de rechter strook en vervolgens weer naar de linker strook om een trager voertuig te passeren. Bij hoge intensiteiten zijn beide stroken behoorlijk vol en neemt het verschil in snelheid tussen de stroken af (zie figuur 26). Het aantal strookwisselen is hierbij zeer beperkt. Evenals bij het eerste voorbeeld ontstaan in de simulatie overigens nooit files: het wegvak bevat immers geen discontinuïteiten.

¹⁰ Zie het scherm 'voertuigparameters' van het menu 'verkeer'.



Figuur 26: Basisdiagram (snelheid - intensiteit) en intensiteiten als functie van de tijd gemeten op een doorsnede halverwege de tweestrooks rijbaan

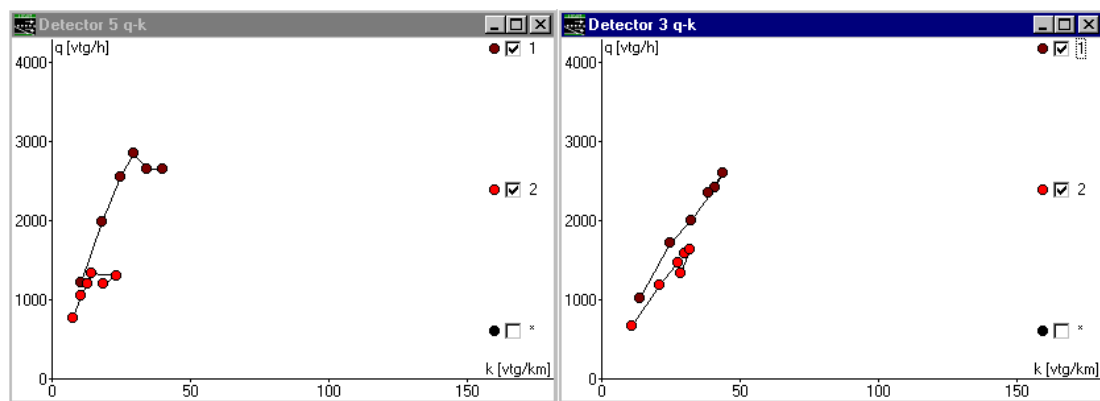
6.4 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN MET SNELHEIDSONDERDRUKKING

Een tweestrooks rijbaan met snelheidsonderdrukking (zie figuur 27) is een variatie op de voorbeelden van paragraaf 6.2 en 6.3. Het aanpassen van de schematisatie is opnieuw zeer eenvoudig: toevoegen van een sectie en hier snelheidsonderdrukking instellen. Intern vindt vergeleken met de eerdere voorbeelden slechts een kleine wijziging plaats: het ontstaan van de wens tot strookwisselen naar links moet telkens aan enige extra voorwaarden voldoen, waardoor het aantal strookwisselingen iets kan afnemen.



Figuur 27: Een tweestrooks rijbaan met deels snelheidsonderdrukking

Ten aanzien van de afwikkeling geldt hetzelfde als in paragraaf 6.2: er is een discontinuïteit toegevoegd. De afwikkeling in sectie 1 is anders dan in de stroomopwaartse secties. Bij voldoende snelheidsonderdrukking kan de capaciteit van sectie 1 kleiner worden dan van de andere secties en ontstaat bij voldoende aanvoer een file stroomopwaarts van de sectie met snelheidsonderdrukking. Figuur 28 geeft de bijbehorende waargenomen basisdiagrammen. Hier is ook te zien welke intensiteiten de twee stroken verwerken. Zoals te verwachten is de intensiteit op de linker strook, waar (praktisch) alleen personenauto's rijden, veel hoger dan op de rechter strook.

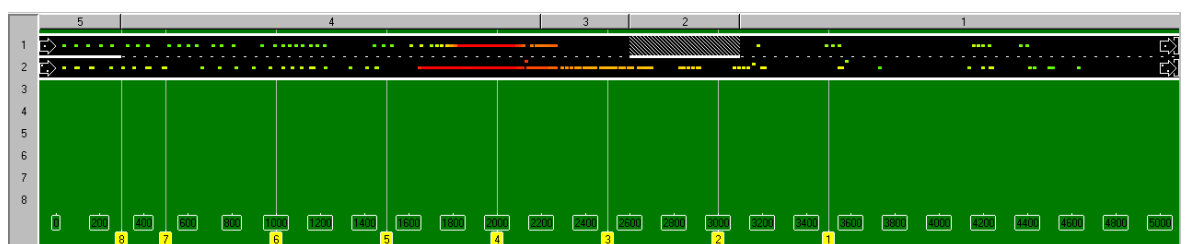


Figuur 28: Basisdiagram (intensiteit - dichtheid) per strook voor een doorsnede stroomopwaarts van sectie 1 (5) en voor een doorsnede in sectie 1 (3)

6.5 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN MET EEN RIJSTROOKVERMINDERING

De voorbeelden in de voorgaande paragrafen kamen mogelijk enigszins kunstmatig over¹¹. Vanaf deze paragraaf gaat het echter steeds meer om situaties waar ook in de praktijk FOSIM voor ingezet wordt. Kenmerkend voor deze situaties is dat de weggeometrie verandert, wat vervolgens gevolgen heeft voor de verkeersafwikkeling. FOSIM dient vervolgens om de verkeersafwikkeling onder invloed van deze discontinuïteiten te onderzoeken.

In dit geval gaat het om een tweestrooksrijbaan die deels enkelstrooks is (zie figuur 29). Het schematiseren van de verkeerskenmerken vindt precies op dezelfde wijze plaats als bij de eerdere voorbeelden. Het schematiseren van de weg vergt nu echter wat meer. Ten eerste moeten enige secties toegevoegd worden om alle strooktypen te definiëren: een sectie waar een strook afgestreept is en stroomafwaarts hiervan een sectie waar de rijbaan weer tweestrooks is. Daarnaast zijn secties nodig om het gewenste en verplichte strookwisselen op te geven.



Figuur 29: Een tweestrooks rijbaan met een rijstrookvermindering

De toevoeging van gewenst en verplicht strookwisselen is ten opzichte van de voorgaande voorbeelden een belangrijke uitbreiding voor de manier waarop FOSIM het verkeer nabootst. In beide gevallen komt het erop neer, dat het de gebruiker de mogelijkheid biedt het verkeer over een bepaald deel van de weg te sturen. Bovendien maakt het onderscheid tussen gewenst en verplicht strookwisselen het mogelijk te beïnvloeden of de druk om van strook te wisselen beperkt of juist groot is. Deze

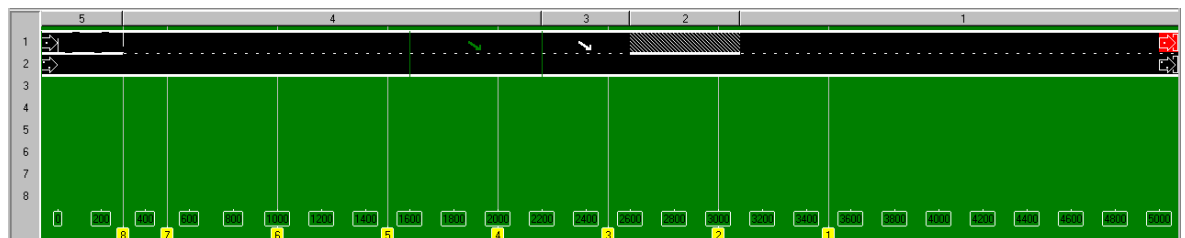
¹¹ Overigens deze voorbeelden wel praktisch altijd voor als onderdelen van een complexere wegconfiguratie.

mogelijkheden het gedrag van het verkeer te sturen hebben echter ook een nadeel: het is niet eenvoudig in te schatten wat een redelijke configuratie is voor het verplicht en gewenst strookwisselen. Dit is één van de punten in een modelstudie waar de inbreng van de modelgebruiker essentieel is. Immers, zoals genoemd, het model kan wel in algemene termen het bestuurdersgedrag beschrijven, maar niet hoe de afwikkeling er in een specifieke, lokale situatie eruit ziet.

De manier waarop het model intern met gewenst en verplicht strookwisselen omgaat, komt behoorlijk overeen met het eerder behandelde strookwisselen in paragraaf 6.3. Opnieuw bepaalt FOSIM of de wens tot strookwisselen bestaat en vervolgens of de strookwisseling niet te risicovol is.

Of de wens tot strookwisselen bestaat hangt nu af van de gegeven invoer. Per sectie¹² is opgegeven of gewenst of verplicht strookwisselen moet plaatsvinden en in welke richting van strook gewisseld moet worden. Deze strookwisselingen hangen altijd samen met een bestemming: alleen die voertuigen die de opgegeven bestemmingen hebben krijgen de wens van strook te wisselen.

In het voorbeeld met de rijstrookvermindering bevindt zich eerst een sectie met gewenst strookwisselen. In dit geval gaat het uiteraard om strookwisselingen op de linker strook. Het gaat uiteraard om strookwisselingen naar rechts. Bovendien betreffen ze alle voertuigen. Aansluitend op de sectie met gewenst strookwisselen volgt een sectie met verplicht strookwisselen, uiteraard ook naar rechts en voor alle bestemmingen.



Figuur 30: Gewenst (meest stroomopwaarts) en verplicht strookwisselen

In het geval van verplicht strookwisselen krijgen alle voertuigen die de betreffende bestemming hebben de wens tot strookwisselen. Met gewenst strookwisselen is dit echter niet het geval: hierbij neemt het aantal voertuigen dat van strook wil wisselen toe met de afgelegde weg op de sectie. Precies aan het begin van de sectie krijgt geen enkel voertuig de wens tot strookwisselen, terwijl aan het eind alle voertuigen de wens tot strookwisselen krijgen. Of een voertuig wel of niet van strook wil wisselen wordt elke tijdstap met loting bepaald.

De berekening van de geaccepteerde versnelling (het risico) is bij gewenst strookwisselen hetzelfde als bij het eerder besproken strookwisselen: hoe lager de actuele snelheid, hoe sterker bestuurders bereid zijn te remmen (en hun nieuwe volgers te laten remmen). De berekening van de toegelaten versnelling bij verplicht strookwis-

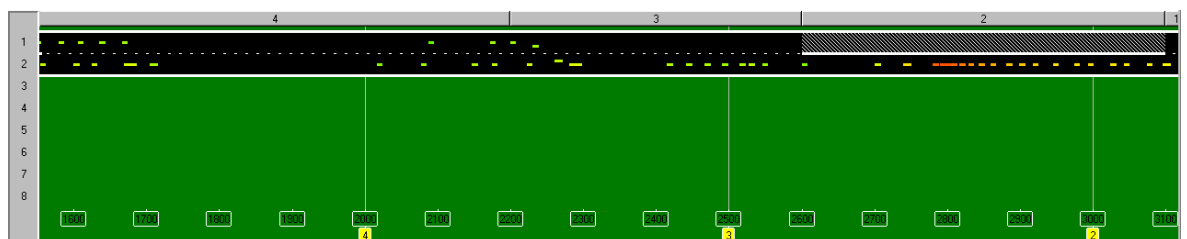
¹² Voor verplicht strookwisselen maakt FOSIM hier gebruik van de secties die ook gebruikt worden voor het opgeven van de geometrie van de weg (fysieke secties). Voor gewenst strookwisselen zijn er aparte secties (strooksecties).

selen verschilt echter. Hier neemt de mate waarin bestuurders bereid zijn te remmen (en hun nieuwe volgers te laten remmen) toe met de afgelegde afstand in de sectie. Aan het begin van de sectie zijn bestuurders in het geheel nog niet bereid te remmen, terwijl aan het eind ze willen gaan tot aan de maximale strookwisseldeceleratie. Wanneer ze dan nog niet van strook kunnen wisselen komen ze in het huidige voorbeeld terecht op een afgestreepte strook. Hierop geldt altijd over de gehele lengte dat bestuurders de maximale strookwisseldeceleratie accepteren.

FOSIM schat de benodigde versnelling om niet in botsing te komen met de nieuwe leider op de strook van bestemming en de versnelling die de nieuwe volger nodig heeft om een aanrijding te voorkomen. Wanneer het gaat om een gewenste strookwisseling controleert FOSIM bovendien ook de versnelling die het voertuig nodig heeft om met de gewenste volgafstand de nieuwe leider te volgen. Indien blijkt dat één van de versnellingen niet voldoet aan de toegelaten versnelling, gaat de strookwisseling niet door.

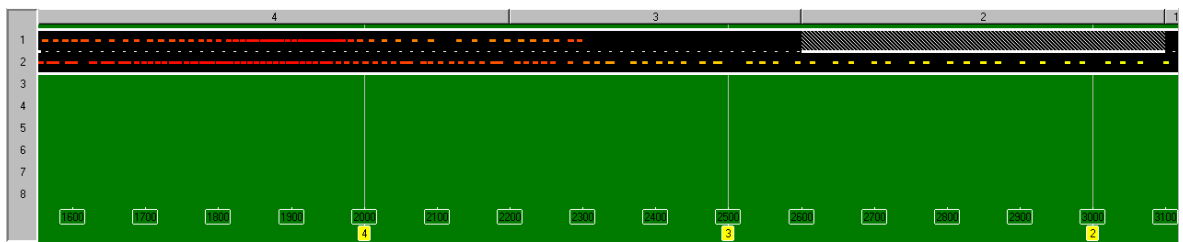
Wanneer de strookwisseling niet plaats kan vinden terwijl het ging om verplicht strookwisselen, bepaalt het model wat een bestuurder kan doen (accelereren of decelereren) om de volgende tijdstap de kans groter te maken dat de strookwisseling wel kan uitgevoerd kan worden. Verder kan de nieuwe volger op de naastgelegen strook ruimte maken voor de strookwisselaar, of het voertuig achter de nieuwe volger. Hiertoe wordt op het betreffende voertuig gewenst strookwisselen toegepast.

In de simulatie leidt dit model tot de volgende afwijking. Zolang de intensiteit de capaciteit van de enkelstrooks sectie niet overschrijdt kunnen voertuigen zonder al te veel problemen van de linker naar de rechter strook wisselen en is de linker strook net stroomopwaarts van de afstropping behoorlijk leeg. Wanneer het drukker wordt, is het echter moeilijker om een geschikt hiaat te vinden op de rechter strook. Voertuigen blijven dan langer links rijden. Aangezien hiermee ook het geaccepteerde risico bij het strookwisselen toeneemt, komen zij er altijd nog wel tussen, maar vaak wel op behoorlijk korte afstand van hun nieuwe leider en volger. Vervolgens compenseren deze voertuigen echter om weer op de gewenste volgafstand te komen. Zo treedt de in hoofdstuk 5 besproken capaciteitstrechter op: de file ontstaat niet stroomopwaarts van de rijstrookvermindering maar stroomafwaarts (zie figuur 31).



Figuur 31: Omstaan congestie

Wanneer de file eenmaal bestaat, verplaatst de kop van de file zich stroomopwaarts (zie figuur 32). Dit komt doordat bij de lagere snelheden (en ook de kleinere snelheidsverschillen tussen de stroken) bestuurders weer eerder (met minder risico ofwel zonder al te sterk te hoeven remmen) naar rechts kunnen wisselen. Hierdoor bevindt al het verkeer zich op behoorlijke afstand van de rijstrookvermindering al op de rechter strook en kunnen de bestuurders hier weer hun snelheid aanpassen om de gewenste volgafstand te bereiken.

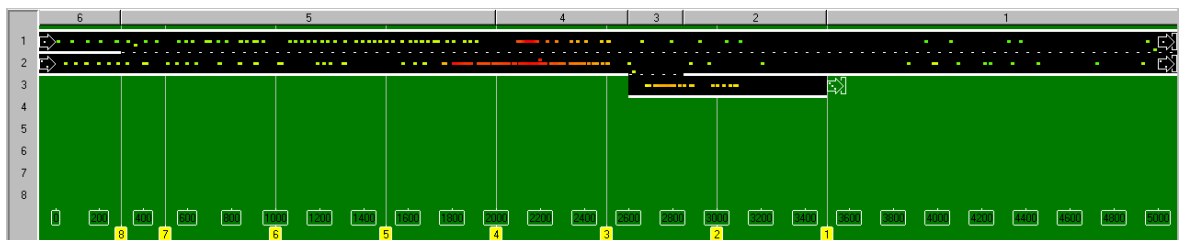


Figuur 32: Locatie congestie enige tijd na ontstaan

Zodra men de rijstrookvermindering bereikt heeft neemt de kwaliteit van de afwikkeling uiteraard weer fors toe. Ter plaatse van de rijstrookvermindering zelf is de intensiteit ongeveer gelijk aan de capaciteit, terwijl stroomafwaarts de hoeveelheid verkeer vergeleken met de capaciteit zeer beperkt is. Men zou hier kunnen spreken van ‘rijbaandosering’.

6.6 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN MET EEN ENKELSTROOKS UITVOERING

In paragrafen 6.1 tot en met 6.5 is praktisch volledig beschreven hoe FOSIM het bestuurdersgedrag nabootst. De overige voorbeelden zijn verdere illustraties van de werking van het model. Het zal blijken dat de verkeersafwikkeling die hierbij resulteert meestal veel overeenkomsten vertoont met de vrij eenvoudige voorbeelden die tot nu toe beschreven zijn.



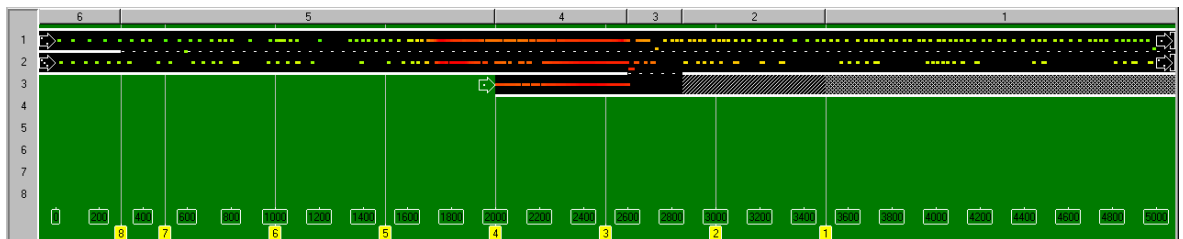
Figuur 33: Een tweestrooks rijbaan met een uitvoeging

Zo blijkt de situatie die deze paragraaf beschrijft, een tweestrooks rijbaan met een uitvoeging (zie figuur 33), een verkeersafwikkeling op te leveren die behoorlijk lijkt op het resultaat van de rijstrookvermindering van de vorige paragraaf. Toch zien de twee situaties er op het oog behoorlijk anders uit.

Wanneer al het verkeer op de hoofdrijbaan blijft, ontstaat dezelfde situatie als bij de tweestrooks rijbaan zonder discontinuïteiten. Wanneer echter al het verkeer naar de afrit wil, lijkt de afwikkeling op de situatie met de rijstrookvermindering. Immers, ook daar moest al het verkeer naar rechts voorsorteren. Hiervoor is echter op de rechter strook niet voldoende plaats. Opnieuw is het capaciteitsrechtereffect waar te nemen. Wanneer een deel van het verkeer naar de afrit wil, is het afhankelijk van de hoeveelheid verkeer die de hoofdrijbaan wil verlaten of de capaciteit bereikt wordt of niet.

6.7 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN MET EEN ENKELSTROOKS INVOEGING

Ook op een tweestrooks rijbaan met een invoeging (zie figuur 34) is het capaciteits-trechtereffect zichtbaar. Het verkeer op de toerit heeft slechts beperkt tijd om van strook te wisselen naar de hoofdrijbaan. Wanneer de intensiteit op de hoofdrijbaan hoog is, zullen bestuurders nogal eens moeten kiezen voor kleine hiaten, waarna ze weer proberen hun volgafstand te vergroten. Ook hier zullen op deze wijze gewoonlijk de eerste tekenen van congestie stroomafwaarts van de invoeging zichtbaar worden. De kop van de file verplaatst zich vervolgens naar het puntstuk: wanneer de file er eenmaal is zijn de voertuigen op de toerit weer in staat direct aan het begin in te voegen zonder dat dit tot problematische remvertragingen leidt.

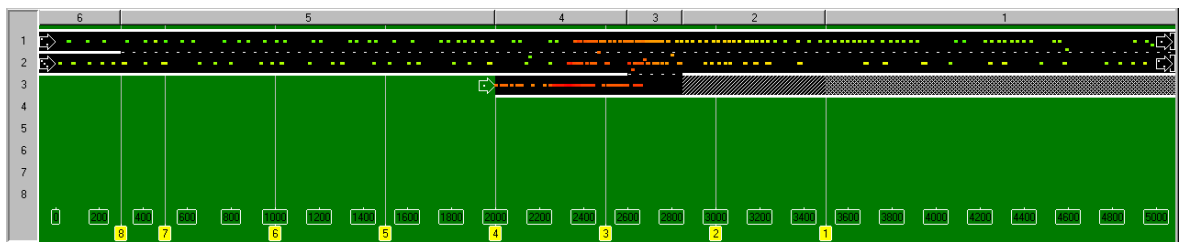


Figuur 34: Een tweestrooks rijbaan met een enkelstrooks invoeging

Een uitbreiding ten opzichte van de eerdere voorbeelden is de manier waarop de file van de ene naar de andere rijstrook op de hoofdrijbaan overslaat. Bestuurders hebben hier immers de mogelijkheid van strook te wisselen als de afwikkeling op de huidige strook te wensen overslaat. Op deze manier is het zelfs denkbaar dat de file begint op de linker strook indien voldoende voertuigen naar deze strook gaan. Zodra eenmaal op één van de stroken een file is ontstaan, zal deze hoe dan ook snel op de andere strook terecht komen. Het risico wat mensen nemen bij niet-verplicht of -gewenst strookwisselen neemt immers toe bij afname van de snelheid. Voertuigen in een file zijn dus tot behoorlijke risico's bereid bij het wisselen naar een andere strook.

6.8 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN MET EEN ENKELSTROOKS INVOEGING EN SNELHEIDSONDERDRUKKING OP DE INVOEGING

Indien zich stroomopwaarts van een toerit een krappe lus bevindt (in FOSIM gemodelleerd met snelheidsonderdrukking, zie figuur 35), zullen de voertuigen in FOSIM gemiddeld langer op de toerit blijven voor zij kunnen invoegen. Immers, wanneer een voertuig met een lage snelheid de autosnelweg betreedt, zullen de nieuwe leiders hier soms sterk voor moeten afremmen. De toelaatbare deceleratie neemt toe met de afgelegde weg op de toerit (hier geldt immers verplicht strookwisselen), zodat bestuurders pas verderop kunnen invoegen. Bovendien kunnen de voertuigen op de toerit nog accelereren, zodat hun snelheden minder verschillen van de snelheid op de hoofdrijbaan.

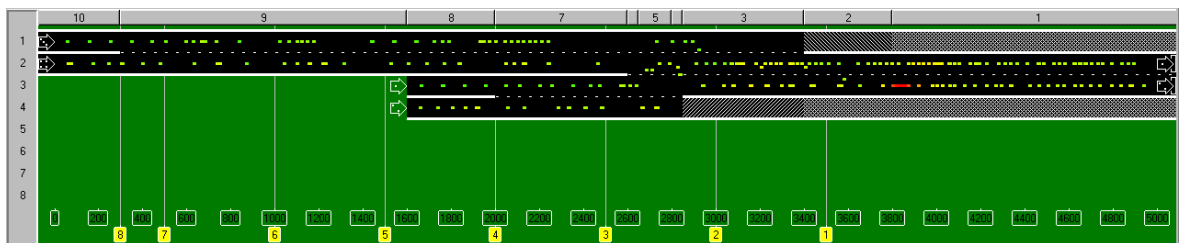


Figuur 35: Een tweestrooks rijbaan met een invoeging stroomopwaarts waarvan snelheidsonderdrukking geldt

Wanneer voertuigen echter niet voldoende kunnen accelereren en met een vrij lage snelheid op de autosnelweg terecht komen verlaagt dit de capaciteit ten opzichte van een situatie met normale snelheden. Zoals beschreven in paragraaf 6.2 neemt de capaciteit immers af bij lagere snelheden. Wanneer een voertuig met een lage snelheid op de rechter strook rijdt, reageert hier bovendien ook het verkeer op de linker strook op. Immers, voertuigen willen in het model langzame voertuigen niet met een al te groot snelheidsverschil passeren.

6.9 EEN TAPERINVOEGING EN EEN RIJSTROOKVERMINDERING

Het voorbeeld in deze paragraaf is enigszins complexer dan de voorgaande situaties: het combineert een taperinvoeging en een rijstrookvermindering (zie figuur 36). Deze twee kunnen ook apart capaciteitsbepalend zijn, maar in dit geval zijn zij samen van invloed. Welke invloed overheerst hangt af van de intensiteit vanaf de hoofrijbaan en de toerit.



Figuur 36: Een taperinvoeging en een rijstrookvermindering

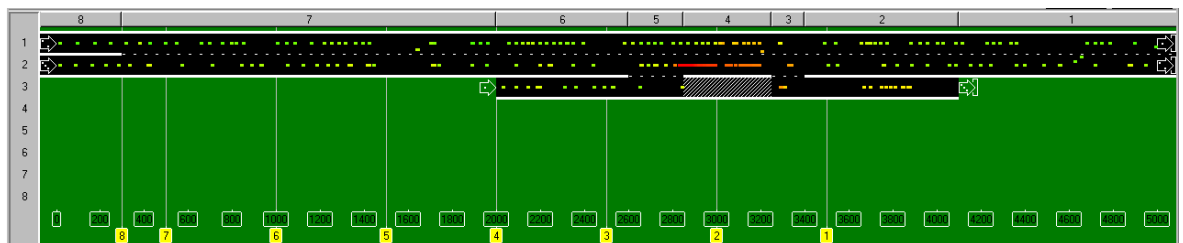
In de handleiding van FOSIM is de schematisatie van een taperinvoeging beschreven: op de taper geldt eerst gewenst strookwisselen naar links. Hierna volgt verplicht van strook wisselen naar links gecombineerd met gewenst strookwisselen naar rechts. Voor deze constructie is intern in het model een voorziening ingebouwd: FOSIM kijkt altijd eerst of de verplichte strookwisseling naar links mogelijk is. Indien dit niet kan kijkt het model in dezelfde tijdstap nog of naar rechts wisselen mogelijk is.

In dit voorbeeld blijkt overigens dat in de huidige versie van FOSIM enige problemen kunnen voorkomen bij het opgeven van het strookwisselen. Voor de rijstrookvermindering is een vrij lange fysieke sectie nodig waar verplicht strookwisselen geldt. Op dezelfde locatie is echter ook een aantal korte fysieke secties nodig voor de taperinvoeging. Hierdoor neemt het geaccepteerde risico bij het strookwisselen vanwege de taper niet geleidelijk toe tot de maximale strookwisseldeceleratie, maar fluctueert deze door de aanwezigheid van de korte fysieke secties.

De plaats waar de file begint blijkt sterk samen te hangen met het HB-patroon. Wanneer het grootste deel van de hoofdrijbaan komt, begint de file ongeveer ter hoogte van de rijstrookvermindering. In het tegenovergestelde geval begint de file aanmerkelijk verder stroomafwaarts.

6.10 EEN TWEESTROOKS RIJBAAN MET OPEENVOLGEND EEN ENKELSTROOKS INVOEGING EN EEN ENKELSTROOKS UITVOEGING

Ook in dit voorbeeld beïnvloeden twee capaciteitsbepalende elementen elkaar (zie figuur 37). Hier bevinden ze zich echter niet op dezelfde locatie maar volgt de een de ander. De opeenvolging van de fysieke secties is hier wederom niet ideaal: het is niet mogelijk het verplichte strookwisselen vanwege de uitvoeging op een enkele sectie te laten plaatsvinden.



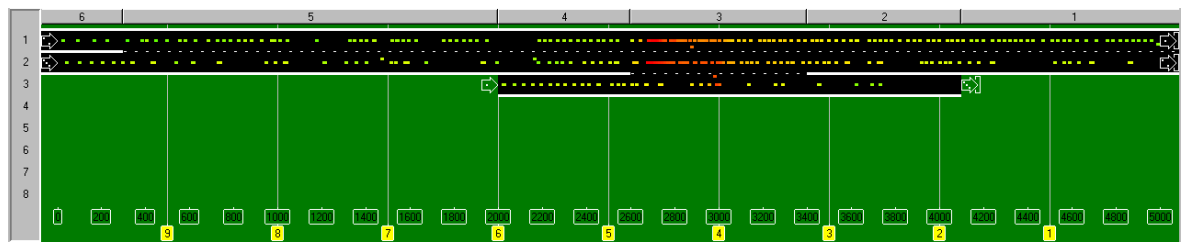
Figuur 37: Een tweestrooks rijbaan met een enkelstrooks in- en een uitvoeging

De rechter strook van de hoofdrijbaan is ter plaatse van de toerit vanwege twee redenen flink belast: verkeer bereikt vanaf de toerit de autosnelweg en uitvoegend verkeer sorteert hier al voor. Dit komt de capaciteit niet ten goede. Tegelijkertijd verlaat een deel van het verkeer vrij direct na de invoeging de autosnelweg. Omdat stroomafwaarts van de invoeging (capaciteitstrechter) vaak de congestie begint, is het mogelijk dat dit een positief effect heeft op de capaciteit. Het totaaleffect is alleen met simulatie te bepalen.

6.11 EEN 2 + 1 SYMMETRISCH WEEFVAK

In plaats van een invoeging en hier op korte afstand vandaan een uitvoeging is het ook mogelijk te kiezen voor een weefvak (zie figuur 38). Specifiek voor een weefvak geldt dat bestuurders vaak tijdelijk kleine volgafstanden kunnen accepteren omdat zij zien dat de voertuigen waar vlak achter zitten zelf ook weer van strook gaat wisselen.

Op het weefvak zelf zal over de gehele lengte verplicht strookwisselen gelden. Verder zal ook stroomopwaarts strookwisselen opgegeven moeten worden, zodat verkeer op tijd voorsorteert.

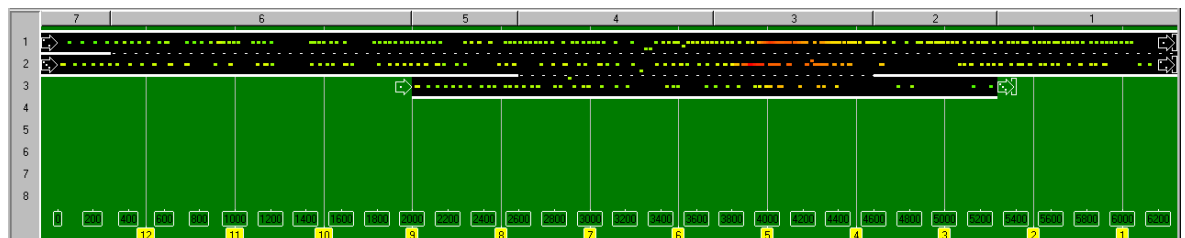


Figuur 38: Een 2+1 symmetrisch weefvak

Hoewel het aantal stroken stroomop- en stroomafwaarts gelijk is, is het toch mogelijk dat hier de capaciteit bereikt wordt, ook wanneer de uitwisseling tussen de rijbanen gelijk is (dat wil zeggen, de hoeveelheid verkeer blijft op beide rijbanen gelijk). De oorzaak hiervan is dat lokaal de dichtheid zeer hoog kan worden door voorsorteren. Indien veel meer verkeer de ene rijbaan verlaat dan er bij komen is het mogelijk dat een weefvak meer als een invoeging of een uitvoeging functioneert.

6.12 WEEFVAK OF SAMENVOEGING EN SPLITSING?

Wanneer de afstand tussen een samenvoeging en een splitsing toeneemt, is er op een gegeven moment geen sprake meer van een weefvak maar van twee losse discontinuïteiten. Voertuigen moeten dan niet meer stroomopwaarts van de samenvoeging voorsorteren en het strookwisselen moet opgegeven worden over de gehele lengte tussen samenvoeging en splitsing. Ook hier is geen algemeen geldig recept te geven, maar is in feite de vraag wat de modelgebruiker verwacht. Wanneer het onduidelijk is welke oplossing toegepast moet worden is het te overwegen enige strookwisselschema's uit te proberen en te kijken hoeveel het uitmaakt.



Figuur 39: Weefvak of samenvoeging en splitsing?

6.13 TER AFSLUITING

Dit hoofdstuk beschreef hoe FOSIM intern werkt en gaf met een aantal voorbeelden aan tot welke modelresultaten dit kan leiden. Uiteraard zijn er veel meer mogelijke situaties mogelijk dan hier weergegeven. Maar ook dan komen de principes die hier voorkwamen geregeld terug. Het is tenslotte niet noodzakelijk alle details die hier beschreven zijn te kennen om nuttig met FOSIM te kunnen werken, maar indien de simulatieresultaten onduidelijk zijn helpt naslag in dit dictaat mogelijk.

REFERENTIES

Greenshields, B.

A study of traffic capacity, Highway Research Board, Proc. Vol 14, 1934, pp. 468-477.

Romph, E. de

A dynamic traffic assignment model. Dissertatie, TUD, 1994.

Toorenburg, J.A.C. van

Praktijkwaarden voor de capaciteit. Verkeerskunde **37**(1986)5 en 6.

LITERATUUR ALGEMEEN

Goede studieboeken op het gebied verkeersstroomtheorie zijn:

Algemeen:

- Leutzbach, W. Introduction to the theory of traffic flow. Springer, 1988.
- Gazis, D.C. Traffic Science. Wiley, 1974.
- Gerlough, D.L. & Huber, M.J. Traffic Flow Theory. Special Report 165. Transportation Research Board, 1975.
- May, A.D. Traffic flow fundamentals. Prentice-Hall, 1990.
- Daganzo, C.F. Fundamentals of transportation and traffic operations. Pergamon, 1997.

Speciaal over kinematische golven en schokgolven:

- Haberman, R. Mathematical Models (Gedeelte over Traffic Flow). Prentice Hall, 1977.

Over dataverzameling en statistische analyse

- Taylor, M.A.P. & Young, W. Traffic analysis. Hargreen, Melbourne, 1988.

Nieuwe ontwikkelingen van het vakgebied staan onder meer:

- In de vaktijdschriften:
- Transportation Science
- Transportation Research
- Traffic Engineering & Control
- Strassenverkehrstechnik
- Strasse und Autobahn
- Transportation Research Records

In de Proceedings van de International Symposia on Highway Capacity:

- | | | |
|-----|-----------------|---|
| I | 1991 Karlsruhe | Highway Capacity and Level of Service, ed. Brannolte, Balkema, Rotterdam. |
| II | 1994 Sydney | Highway Capacity, ed. Akçelik, ARRB & TRB. |
| III | 1998 Copenhagen | Highway Capacity, ed. Rysgaard, Danish Road Directorate & TRB. |

