

STATE OF THE ART RAPPORT "VERKEERSSTROOMMODELLEN"

Deel VI. Mesoscopische verkeersstroombmodellen

R-78-40

Ir. H. Botma

Voorburg, 1978

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Samenvatting

1.	<u>Inleiding</u>	1
2.	<u>Clustermodellen</u>	2
2.1.	Inleiding	2
2.2.	Tweerichtingsverkeer op twee rijstroken	3
2.2.1.	Inleiding	3
2.2.2.	Modelaspecten	5
2.2.3.	Evaluatie	10
2.3.	Eenrichtingsverkeer op een rijstrook	11
2.3.1.	Vorming van clusters	11
2.3.2.	Uiteenvallen van clusters	13
2.3.3.	Groei en afbraak van een file	14
2.3.4.	Evaluatie	15
2.4.	Eenrichtingsverkeer op meer dan een rijstrook	15
2.4.1.	"Miller" model	16
2.4.2.	Model van Rørbech	18
2.4.3.	Evaluatie	19
2.5.	Dispersiemodellen	20
3.	<u>Boltzmannmodellen</u>	23
3.1.	Inleiding	23
3.2.	Het model	24
3.3.	Homogene en stationaire toestand	26
3.4.	Toetsingen	27
3.5.	Alternatieve modellen	28
3.6.	Evaluatie	29
4.	<u>Slotbeschouwing</u>	31

Afbeeldingen

Literatuur

Appendix A: Literatuur clustermodellen tweerichtingsverkeer op twee rijstroken

SAMENVATTING

In het zesde deel van het State of the art rapport "Verkeersstroommodellen" worden mesoscopische verkeersstroommodellen behandeld, die het gedrag van mesoscopische verkeersstroomkenmerken beschrijven.

Als eerste worden de clustermodellen behandeld, zo genoemd omdat clusters er een centrale rol in spelen. Onderscheiden worden clustermodellen voor tweerichtingsverkeer op twee rijstroken, eenrichtingsverkeer op een rijstrook en eenrichtingsverkeer op twee of meer rijstroken.

Voor het eerste geval zijn relatief veel modellen opgesteld. Evaluatie hiervan is moeilijk omdat vrijwel nog geen vergelijking met de realiteit heeft plaatsgevonden. Er wordt een overzicht gegeven van de diverse modelaspecten.

Voor eenrichtingsverkeer op een rijstrook zijn modellen te onderscheiden die de vorming van clusters, het uiteenvallen van clusters en de groei en afbraak van een file beschrijven. Van elk geval wordt een model besproken.

Voor eenrichtingsverkeer op meer dan een rijstrook zijn niet zoveel modellen opgesteld. Ze zijn meest van hetzelfde type als de modellen voor tweerichtingsverkeer op twee rijstroken en zijn evenzo moeilijk te toetsen. Daarnaast is er een eenvoudiger model opgesteld, dat met relatief eenvoudig observeerbare grootheden onderzocht kan worden. Het blijkt dat de toestandsveranderingen van voertuigen tussen twee wegdoorsneden, waarbij de toestand bepaald wordt door het al of niet in cluster rijden en de rijstrook, volgens een eerste orde Markov proces verlopen.

Min of meer apart staan de modellen die beschrijven hoe clusters, die een aantal geregelde kruisingen passeren, van omvang veranderen. Het zogenaamde diffusiemodel dat hiervoor is opgesteld blijkt redelijk te voldoen, hoewel het gebaseerd is op nogal onrealistische veronderstellingen.

Als tweede worden de Boltzmannmodellen behandeld, die hun naam danken aan een analogie met statistisch-mechanische beschouwingen van stelsels deeltjes. Hierin staan niet de clusters maar de snelheidsverdelingen centraal. Deze modellen zijn uitsluitend opgesteld voor eenrichtingsverkeer op meer dan een rijstrook, waarbij de rijstroken niet apart behandeld worden.

Het model wordt geformuleerd als een differentiaal-integraal-vergelijking voor de snelheidsverdeling. Hierin moet tot uiting komen dat: snelheden dalen ten gevolge van beperkte inhaalmogelijkheden; na een snelheidsdaling de wenssnelheid weer geleidelijk bereikt wordt; en bestuurders bij grote drukte de neiging hebben zich bij de gemiddelde snelheid aan te passen.

Het model is in een homogene en stationaire situatie getoetst met nog in discussie zijnde resultaten. Een theoretische analyse wijst er op dat het model, zelfs voor geringe dichtheden, niet geheel juist is. Dit is aanleiding tot het opstellen van een nog complexer model, waarvan toetsing zeer moeilijk zal zijn.

De belangrijkste conclusie is dat er veel mesoscopische verkeersstroommodellen zijn opgesteld, die vrijwel nog niet getoetst zijn. De bruikbaarheid van deze modellen is dan ook voorlopig grotendeels onbekend.

1. INLEIDING

In Deel V van het State of the art rapport "Verkeersstroombodellen" zijn de zogenaamde mesoscopische verkeersstroombodellen behandeld. Dit waren met name de volgtijden, volgfstanden, snelheden en combinaties van deze kenmerken, die beschouwd werden voor bepaalde verzamelingen van voertuigen, en de hieruit af te leiden kenmerken zoals verdelingen.

In dit deel komen de interacties tussen deze kenmerken aan de orde, de mesoscopische verkeersstroombodellen. Deze interacties vinden hun oorsprong op microscopisch niveau, immers individuele bestuurders reageren op kenmerken van andere voertuigen (positie, snelheid, koers). In de mesoscopische modellen worden de individuele interacties samengevat tot relaties tussen mesoscopische kenmerken, waarbij de voertuigen als het ware anoniem worden. De samenvatting gaat echter minder ver dan bij de macroscopische modellen, waarbij uitsluitend gemiddelde waarden van de mesoscopische kenmerken (intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid) beschouwd worden.

Er is een onderscheid gemaakt tussen clustermodellen, waarin clusters een centrale rol vervullen, en Boltzmanmodellen waarin dat voor de snelheidsverdeling geldt. De clustermodellen zijn verder verdeeld naar de verkeerssituatie, waarbij onderscheiden worden: tweerichtingsverkeer op twee rijstroken, eenrichtingsverkeer op een, en op meer dan een rijstrook.

In vrijwel alle modellen is het uitgangspunt dat bestuurders een wenssnelheid hebben. Dit is de snelheid die gereden wordt als er geen invloed van andere voertuigen is; dus praktisch bij geringe voertuigdichtheid. De te behandelen modellen trachten te beschrijven wat er gebeurt als ten gevolge van de interacties van voertuigen de wenssnelheden niet meer permanent gereden kunnen worden.

2. CLUSTERMODELLEN

2.1. Inleiding

In Deel V van dit rapport is het begrip cluster al geïntroduceerd. Kort gezegd is het een groep voertuigen op een rijstrook die in dezelfde richting rijden en waarbij ieder voertuig duidelijk beïnvloed wordt door zijn voorligger (met uitzondering van de "leider" van het cluster die er meestal wel toe gerekend wordt). De beïnvloeding komt vooral tot uiting in de geringe snelheidsverschillen. Praktisch wordt een cluster meestal gedefinieerd met een grenswaarde voor volgtijd of volgafstand. De keuze van de grenswaarde is afhankelijk van het doel waartoe men clusters beschouwt.

De naam clustermodellen voor de in het volgende te behandelen modellen is gekozen omdat de clusters er een centrale rol in spelen.

Van clusters kunnen diverse aspecten beschouwd worden. Hier gaat het voornamelijk om de omvang, uitgedrukt in aantal voertuigen, en de snelheid van het cluster en niet om het "interne" clustergedrag (volgafstanden, snelheidsverschillen e.d.). De omvang van clusters is niet constant; er is sprake van groei en afbraak of uiteenvallen.

Clusters ontstaan vrijwel altijd ten gevolge van beperkte inhaal mogelijkheden en dit levert een geschikt eerste indelingsprincipe op. Te onderscheiden zijn:

I. Situaties waarin inhalen onmogelijk of verboden is (bv. éénstrooksweg voor een richting, rijbaan tunnelweg met strookwisselverbod, strookwisselverbod op helling voor stijgend verkeer).

II. Situaties waarin inhalen beperkt mogelijk is.

a. ten gevolge van naastliggers (meerstrooksrijbaan voor een richting)

b. ten gevolge van tegenliggers (tweestrooksrijbaan voor

twee richtingen)

c. ten gevolge van beperkt inhaalzicht (van belang in combinatie met b).

Het geval I wordt behandeld in par. 2.3., IIa in par. 2.4. en de combinatie IIb en c in par. 2.2.

Opmerking. Driestrooksrijbanen voor twee richtingen worden buiten beschouwing gelaten omdat dit type weg in Nederland vrijwel niet meer voorkomt.

Een tweede indelingsprincipe is gebaseerd op het karakter van het model.

I. Het model beschrijft een evenwichtssituatie. Men zou van een dynamisch evenwicht kunnen spreken; de voertuigen wisselen bijvoorbeeld wel van snelheid maar de macroscopische en mesoscopische verkeersstroomkenmerken, zoals intensiteit en snelheidsverdeling, zijn constant. Vermoedelijk beschrijven deze modellen ook relatief langzame veranderingen van het evenwicht, de zogenaamd quasi-statische overgangen.

II. Het model beschrijft een dynamische situatie, bijvoorbeeld de overgang tussen twee toestanden van evenwicht. De meeste clustermodellen vallen in de eerste categorie, met uitzondering van de in par. 2.5. te behandelen dispersiemodellen.

2.2. Tweerichtingsverkeer op twee rijstroken

2.2.1. Inleiding

Deze verkeerssituatie komt zowel binnen als buiten de bebouwde kom veel voor. De opgestelde modellen zijn in het algemeen slechts van toepassing te achten voor relatief lange aders, zonder of met te verwaarlozen effect van kruisingen en uitritten, zodat het in feite gaat om rurale enkelbaanswegen met twee rijstroken. Dit wegtype is van groot belang omdat het veel voorkomt en vanuit het oogpunt van verkeersprestatie en onveiligheid. Zo vermeldt Brilon (1974) dat voor West-Duitsland geldt dat ten opzichte van autosnelwegen de voertuigprestatie en inves-

teringen voor dit wegtype een factor drie groter zijn en het ongevallenquotiënt een factor twee. In een studie van de OECD (1972) wordt gesteld dat de drukke (meer dan 5000 voertuigen/etmaal) rurale enkelbaanswegen een klein gedeelte van de tweestrookswegen vormen (orde 1%), maar dat er een groot gedeelte (orde 20%) van het aantal ongevallen op dat type weg gebeurt.

Het moeilijke punt op dit wegtype wordt gevormd door het inhalen. Hierbij moeten de bestuurders vele variabelen observeren en verwerken, waarbij vooral het schatten van de snelheid van de tegenligger met grote fouten gepaard gaat.

Kwalitatief is de verkeersstroom betrekkelijk eenvoudig te beschrijven. Bij toenemen dichtheid treden achtereenvolgens de volgende toestanden op:

- . Inhalen geen probleem, tenzij de zichtlengte van de weg erg gering is.
- . Inhaalmanoeuvres kunnen niet meteen uitgevoerd worden; inhalers zijn gedwongen korte tijd met de snelheid van hun voorligger te rijden; er ontstaan korte clusters met een korte levensduur.
- . Inhalen wordt moeilijker; clusters worden langer en blijven langer bestaan.
- . Inhalen slechts zelden mogelijk; clusters worden zeer lang; de langzaamste voertuigen bepalen de snelheid.

Over de modellen die voor deze situaties zijn opgesteld eerst enige algemene opmerkingen:

- . Beschreven wordt slechts de evenwichtssituatie, dat wil zeggen bepaalde macroscopische kenmerken (meestal dichtheid of intensiteit) en mesoscopische kenmerken (verdelingen van wensnelheden, clusterlengten en afstanden tussen clusters) worden constant en ten dele bekend verondersteld. Men zou van een dynamisch evenwicht kunnen spreken, waarbij individuele voertuigen bijvoorbeeld wel hun snelheid kunnen veranderen.
- . Er bestaan relatief veel modellen en ze zijn nogal onafhan-

kelijk van elkaar tot stand gekomen. Dit heeft onder andere tot gevolg dat de eenvoudige geen bijzonder geval van de complexe zijn.

. De modellen zijn vrijwel nog niet getoetst door vergelijking met reëel verkeer. De geldigheid er van kan daarom meestal alleen beoordeeld worden met behulp van de aannemelijkheid van de berekende gevolgen.

. Gezien het te beschrijven verschijnsel is het geen wonder dat de modellen nogal complex zijn. Dit bemoeilijkt wel hun hanteerbaarheid en de onderlinge vergelijking.

Uit het bovenstaande volgt dat het nogal moeilijk is de diverse modellen te evalueren, vooral omdat vergelijking met de realiteit nog vrijwel ontbreekt.

2.2.2. Modelaspecten

In plaats van de modellen afzonderlijk te behandelen zal een overzicht gegeven worden van diverse modelaspecten zoals ze voorkomen, aangevuld met commentaar. De geraadpleegde literatuur is opgesomd in Appendix A.

A. Wegkenmerken

- De weg wordt homogeen verondersteld voor wat betreft de snelheid, dat wil zeggen voertuigen veranderen hun snelheid niet uitsluitend ten gevolge van wegkenmerken. Dit sluit dus wegen met scherpe bogen en steile hellingen uit.

- Er komen geen kruisingen voor, noch verkeersbronnen of putten (bestemmingen). Praktisch zal het er om gaan in welke mate onbelangrijke kruisingen, uitwegen en parkeerplaatsen langs de weg nog toelaatbaar zijn.

Ten aanzien van de zichtlengte komen drie veronderstellingen voor:

a) de zichtlengte is onbeperkt, dat wil zeggen zo groot dat hij geen invloed op het inhalen heeft;

- b) de zichtlengte is alleen op bepaalde korte weggedeelten zo groot dat daar inhalen mogelijk is en elders niet (zie bv. Galin & Epstein, 1974);
- c) de zichtlengte (Z) verloopt als functie van de positie langs de weg zaagtandsgewijs boven een zeker minimum (Z_0); zie Afbeelding 1. Passeert men een zichtbeperkend element (bv. boog) dan neemt het zicht daarna sprongsgewijs toe en daalt vervolgens lineair tot het volgende element. De plaats van de sprongpunten wordt stochastisch verondersteld met onafhankelijke exponentieel verdeelde tussenafstanden. Dit model is geïntroduceerd door Gustavsson (1967).

Veronderstelling a) kan voor een vrij rechte en vlakke weg wel reëel zijn, b) is nogal kunstmatig en c) is gebleken in sommige gevallen een vrij goede beschrijving te zijn van de realiteit (zie Afbeelding 2, ontleend aan Gustavsson (1967) en Erlander (1971)).

B. Verkeersstroom op een strook

- Wenssnelheden

Aan ieder voertuig wordt een wenssnelheid toegekend die indien mogelijk gereden wordt. De wenssnelheden zijn onderling onafhankelijke en identiek verdeelde stochastische variabelen met een nog nader te kiezen verdeling.

- Voertuiglengte

- a) Nul, dat wil zeggen de voertuigen zijn punten. Bij geringe dichtheid kan dit een toelaatbare benadering zijn.
- b) Alle lengten gelijk. Dit komt het meeste voor en is voor personenautoverkeer voldoende reëel.
- c) Verschillende lengteklassen. Dit is noodzakelijk bij gemengd verkeer maar komt nog niet voor. (Wel in het microscopische model van Yeo (1975) dat bedoeld is om opgenomen te worden in een mesoscopisch model).

- Clusters

Als clusterdefinities worden gebruikt:

- a) Volgafstand nul. In combinatie met de veronderstelling

voertuiglengte is nul betekent dit dus dat het cluster ook afmeting nul heeft. Dit is zeker een bezwaar in een situatie waarin vrij veel clusters voorkomen.

b) Volgafstand heeft zekere waarde, eventueel nog afhankelijk van de snelheid.

- Naderen voorligger

Op het moment dat een voertuig of een cluster op een voorligger stuit, en niet meteen gaat inhalen, daalt de snelheid sprongsgewijs tot die van de voorligger.

De verkeersstroom op een strook wordt gekenmerkt door clusters (geïsoleerd rijdende voertuigen zijn clusters van lengte 1) van verschillende lengtes (c) met verschillende snelheden (v) (dit zijn de wensnelheden van de clusterleiders) en met netto volgafstanden tussen de clusters (s). Binnen een cluster zijn alle snelheden en volgafstanden gelijk. De variabelen c , v en s zijn stochastische variabelen met in evenwicht zekere constante verdelingen. Ze zijn niet onafhankelijk: langere clusters zijn gemiddeld langzamer; meer lange clusters betekent bij gegeven voertuigdichtheid grotere netto volgafstanden tussen de clusters.

C. Inhalen

Via het inhalen komt de interactie tussen de verkeersstromen in beide richtingen en het effect van de zichtlengte tot stand. Het inhalen is een complex verschijnsel wat tot een grote variatie van modellen heeft geleid. De modellen vallen in twee categorieën uiteen:

- a) beschouwd wordt het gedrag van de stroom in één richting bij constante en gegeven kenmerken van de tegenstroom;
- b) beschouwd wordt de wederzijdse beïnvloeding van beide stromen.

- Vliegend en versnellend inhalen

Inhalen kan gebeuren zonder snelheidsverandering van de inhaler, het zgn. vliegend inhalen, of vanuit een cluster waarbij versneld moet worden. Beide gevallen zijn in de meeste modellen opgenomen, denkbare tussengevallen niet.

- Versnellen

De benodigde snelheidsvermeerdering van gereden clustersnelheid naar wenssnelheid wordt vrijwel steeds gemodelleerd als een snelheidssprong. Dit is niet realistisch en leidt o.a. tot een te kleine benodigde inhaalruimte, wat echter te compenseren is met de marge (zie onder inhaalruimte).

Het is denkbaar dat voertuigen tijdens het inhalen, ook als er niet van een noodsituatie sprake is, sneller rijden dan met hun wenssnelheid. Dit komt niet in modellen voor.

- Wachtrijdiscipline

In principe kan elk voertuig van het cluster, uitgezonderd de leider, als eerste gaan inhalen. De volgende gevallen komen voor:

a) Het voertuig achter de clusterleider haalt als eerste in. Dit is de zgn. FIFO (first in, first out) discipline, welke het mogelijk maakt bepaalde resultaten uit de wachttijdtheorie te gebruiken. De veronderstelling lijkt niet realistisch, vooral niet als de potentiële inhaler een wenssnelheid heeft die de clustersnelheid slechts weinig overtreft.

b) Ieder voertuig heeft dezelfde kans als eerste te gaan inhalen. Dit lijkt niet realistisch bij lange clusters.

Meer realistisch zou zijn als de kans als eerste te gaan inhalen afhankelijk was van positie in cluster en wenssnelheid minus clustersnelheid, en tevens van de beschikbare versnelling.

- Inhaalruimte

De benodigde inhaalruimte op de andere strook is afhankelijk van wenssnelheid en positie in het cluster van de inhaler, de clustersnelheid, de marge en de inhaalafstand. Het laatste is de afstand die in de linkerstrook wordt afgelegd ten opzichte van de ingehaalde voertuigen. De beschikbare inhaalruimte is afhankelijk van de zichtlengte en de positie en snelheid van de eerste tegenligger op het moment dat de inhaalmanoeuvre begint. Behalve de positie in het cluster spelen de andere variabelen in de meeste modellen een rol. Voor wat betreft de snelheid van de tegenligger zijn er nog twee

gevallen te onderscheiden:

- a) Gerekend wordt met de echte snelheid van de tegenligger. Dit is niet realistisch omdat deze snelheid voor bestuurders heel moeilijk te schatten is. Compensatie kan gevonden worden in de keuze van de marge.
- b) Gerekend wordt met een vaste hoge snelheid van de tegenligger.

- Invoeegruijnte

Behalve de inhaalruimte op de linkerstrook is een invoe-gruimte op de eigen strook nodig. De benodigde invoe-gruimte hangt af van de voertuiglengte van de inhaler en de clusterdefinitie; de beschikbare invoe-gruimte van posities en snelheden van de begrenzzende voertuigen op het moment dat de inhaalmanoeuvre begint en de inhaaltijd. Er zijn modellen waarbij het invoegen totaal niet beschouwd wordt, met andere woorden aangenomen wordt dat het altijd mogelijk is, in andere is het wel opgenomen.

De bovenstaande modelaspecten zijn ten dele van microscopische aard. In de mesoscopische modellen worden ze verwerkt tot relaties tussen verdelingen, het individuele karakter van de voertuigen gaat verloren.

D. Technieken

Wiskundig gezien komen de volgende modelvormen, soms in combinatie, voor:

- . Wachtijdmodellen
- . Markov processen
- . Differentiaalvergelijkingen
- . Integraalvergelijkingen
- . Monte Carlo simulatie

E. Resultaten

Met behulp van de modellen laten zich diverse zaken onderzoeken en berekenen, zoals:

- . Is het veronderstelde evenwicht wel stabiel
- . Wat zijn de gemiddelde reistijden, gegeven de wenssnelheden
- . Hoe sterk is de clustering van de verkeersstroom

- . Hoeveel inhaalmanoeuvres komen voor
 - . Wat is het effect van intensiteit of dichtheid op de diverse grootheden
 - . Tot wat voor basisdiagram leidt het model
 - . Wat is het effect van maatregelen als snelheidslimieten en een andere minimale zichtafstand.
- De waarde van deze resultaten is echter voorlopig beperkt omdat ze met grotendeels ongeverifieerde modellen verkregen zijn.

2.2.3. Evaluatie

Zoals al eerder gesteld is onderzoek naar de geldigheid van de modellen nog maar zeer beperkt uitgevoerd. Op grond daarvan is nog niet te zeggen wat de belangrijkste modelelementen zijn en welke eventueel weggelaten kunnen worden. Het is ook mogelijk dat de modellen nog uitgebreid moeten worden, bijvoorbeeld op de volgende punten:

- . zichtbeperkingen ten gevolge van voertuigen (vrachtauto's);
 - . veranderend inhaalgedrag als functie van de wachttijd (ongeduld of juist berusting);
 - . variaties binnen de clusters;
 - . meer variatie van bestuurdersgedrag en voertuigkenmerken.
- Anderzijds is een uitbreiding denkbaar naar situaties waar niet van evenwicht sprake is.

In plaats van met de realiteit zou men als eerste stap de resultaten van de diverse modellen kunnen vergelijken met die van een microscopisch simulatiemodel (zie Deel VIII). Hiermee zou de gevoeligheid van de modelresultaten voor de diverse veronderstellingen en parameterwaarden onderzocht kunnen worden. Met een dergelijke opzet heeft Warnshuis (1967) een begin gemaakt, waarbij bijvoorbeeld bleek dat de vorm van de verdeling van de wenssnelheden niet veel invloed heeft op de relatie tussen wenssnelheden en gereden snelheden, maar wel op de verdeling van de clusterlengtes. Voor de

microscopische simulaties is natuurlijk kennis van het individuele voertuiggedrag nodig, die nog maar ten dele beschikbaar is.

De modellen zijn tot nu toe nog niet werkelijk toegepast. Het effect van maatregelen als snelheidslimieten, inhaalverboden, geometrische veranderingen (zichtafstand), veranderingen van vermogen-gewichtsverhoudingen van vrachtauto's kan er in principe mee bepaald worden. Een bijzondere mogelijke toepassing op het gebied van de verkeersbeheersing wordt genoemd door Brilon (1974) en is geïnspireerd door de resultaten van zijn model. Het blijkt dat de overgang van nog redelijk veel inhaal mogelijkheden naar vrijwel afwezigheid daarvan, gezien als functie van de intensiteit, nogal plotseling optreedt. Dit kan tot extra onveiligheid leiden die mogelijk is te verminderen door middel van een intensiteitsafhankelijk inhaalverbod.

Algemeen gesteld: de modellen kunnen nuttig zijn voor het verkrijgen van meer inzicht in aspecten van het gedrag van de verkeersstroom en op die manier bruikbaar zijn bij indicatie, ontwerp en evaluatie van maatregelen. Voor realisering hiervan is echter nog veel onderzoek nodig naar de realiteitswaarde van de modellen.

2.3. Eenrichtingsverkeer op een rijstrook

In dit geval is inhalen onmogelijk en is de situatie, in vergelijking met die waarbij inhalen beperkt mogelijk is, betrekkelijk eenvoudig. Er zullen drie typen modellen behandeld worden.

2.3.1. Vorming van clusters

De belangrijkste bijdrage voor dit geval is afkomstig van Cowan (1971) die het volgende model beschouwt (zie ook Afbeelding 3):

- . wegvak ter lengte X waarop niet ingehaald wordt;
- . homogeen wegvak, d.w.z. de voertuigen rijden, indien niet gehinderd door voorliggers, met constante snelheid;
- . voor elk voertuig bestaat er een minimale volgtijd τ_0 , zowel bij het binnenrijden van het wegvak als bij het rijden in een cluster; de τ_0 's zijn stochastische variabelen met een zekere verdeling;
- . elk voertuig heeft een vaste wenssnelheid; de wenssnelheden zijn stochastische variabelen met een zekere verdeling;
- . bij het binnenrijden van het wegvak is de volgtijd $\tau_0 + \tau$; de τ 's zijn stochastische variabelen met een zekere verdeling;
- . als een voertuig op een voorligger stuit met een lagere snelheid wordt bij een volgtijd τ_0 de snelheid onmiddellijk aangepast;
- . het feit dat een voertuig het eind van het wegvak heeft bereikt heeft geen effect op de achterligger;
- . de situatie is stationair, d.w.z. gemiddelden en verdelingen zijn constant in de tijd.

Uitgaande van deze veronderstellingen worden met analytische methoden een aantal resultaten afgeleid, waarvan de belangrijkste zijn:

- . Van de gemiddelde reistijd per eenheid van afstand stijgt het gemiddelde en daalt de variantie met weglengte X en intensiteit q .
- . Voor een individueel voertuig stijgt de extra reistijd sterk met de wenssnelheid.
- . De gemiddelde clusterlengte stijgt met X en q .
- . De dichtheid (k) van de voertuigen neemt toe met de afstand tot de ingang.
- . Het "basisdiagram" (q als functie van de gemiddelde dichtheid over het hele wegvak) ligt lager naarmate X groter is.
- . Vanaf een intensiteit van 5 voertuigen/min is de volgtijd tussen twee clusterleiders bij benadering exponentieel (van belang voor koppeling met model op aansluitend wegvak).

Behalve het laatste punt zijn de resultaten kwalitatief in overeenstemming met de verwachting. De waarde van het model ligt echter in de voorspelling van kwantitatieve relaties, waarvan de realiteit overigens nog moet blijken. Uitbreiding van het model naar een inhomogene weg is mogelijk.

Potentiële toepassingen van het model zijn alle gevallen waarbij van éénstrooksverkeer sprake is; bv. wat is het effect van een om veiligheidsredenen ingesteld inhaalverbod op de reistijden; wat is het effect van het aanbrengen van een extra rijstrook op hellingen (kruipspoor) dat juist inhalen weer mogelijk maakt; met welke clusterlengtes moet men rekenen bij een verkeerslicht met stroomopwaarts éénstrooksverkeer.

Verwante beschouwingen zijn gepubliceerd door Miller (1967), Epstein et al (1974) en Kockelke (1974). Frappant is dat de laatste auteur, in plaats van analytische methoden, simulaties nodig heeft voor het bereiken van aan Cowan gelijkwaardige resultaten.

2.3.2. Uiteenvallen van clusters

Het volgende door Newell (1959) opgestelde model beschrijft in zekere zin de omgekeerde situatie als in de vorige paragraaf. Het model is als volgt opgebouwd (zie ook Afbeelding 4):

- . wegvak ter lengte X waarop niet ingehaald wordt;
- . homogeen wegvak, d.w.z. de voertuigen rijden, indien niet gehinderd door voorliggers met constante snelheid;
- . elk voertuig heeft een vaste wenssnelheid w ; de w 's zijn stochastische variabelen met een zekere verdeling;
- . alle voertuigen rijden het wegvak binnen met dezelfde volgafstand s_0 ;
- . de snelheid van een voertuig is het minimum van de snelheid van de voorligger en de eigen wenssnelheid;
- . volgen gebeurt met dezelfde constante volgafstand als bij het begin van het wegvak;

- . als een voertuig het eind van het wegvak heeft bereikt heeft het meteen geen invloed meer op de achterligger;
- . snelheidsveranderingen gebeuren ogenblikkelijk.

Deze veronderstellingen leiden tot de volgende resultaten:

- . De capaciteit van het wegvak daalt met toenemende X , waarbij vanaf zekere X de waarde gelijk wordt aan de minimaal voorkomende snelheid gedeeld door s_0 .
- . De snelheid van een voertuig is een monotoon niet dalende functie van de afstand tot het begin van het wegvak en hetzelfde geldt voor de volgafstand.

Gezien de nogal uitzonderlijke veronderstellingen bij begin en eind van het wegvak lijkt dit model niet veel toepassingsgebieden te hebben. Newell noemt zelfde verkeersstroom in een tunnel tussen de flessehals (die in de tunnel meestal omstreeks het begin van de stijgende helling blijkt te liggen) en de uitgang. Vergelijking met de realiteit heeft nog niet plaatsgevonden.

2.3.3. Groei en afbraak van een file

Indien bij eenstrooksverkeer een voertuig enige tijd stilstaat zal er achter een rij stilstaande voertuigen ontstaan, waarvan de groei en de eropvolgende afbraak beschouwd kunnen worden. McNeil (1969) heeft voor deze situatie een model opgesteld (zie Afbeelding 5):

- . in de ongestoorde situatie rijden alle voertuigen met dezelfde snelheid V en met volgtijden die exponentieel verdeeld zijn;
- . voertuig nr. 1 komt ten tijde $t = 0$ tot stilstand, blijft gedurende een stochastische tijdsduur s_1 staan, en vertrekt daarna met snelheid V ;
- . voertuig nr. 2 komt tot stilstand als het voor het eind van s_1 arriveert en vertrekt nadat de tijd $s_1 + s_2$ verstreken is, enz.; de tijden s_i met $i > 1$ hebben een verdeling ongelijk aan die van s_1 .
- . snelheidsveranderingen gebeuren ogenblikkelijk.

Uitgaande van deze veronderstellingen worden met analy-

tische methoden (wachttijdmodellen en Markov processen) verwachting en variantie van diverse grootheden bepaald, met name het aantal voertuigen betrokken bij de stremming, de totale wachttijd, de duur van de stremming, de uitgestrektheid van de file, in afhankelijkheid van intensiteit, snelheid en de verdelingen van s_1 en s_i met $i > 1$.

Het model is nog niet vergeleken met de realiteit. Potentiële toepassingsgebieden zijn de situaties bij een met verkeerslichten geregelde kruising en bij onverwachte stremmingen. Verwante modellen zijn behandeld door Shaw (1970) en Brill (1972), waarbij geen stilstand maar een snelheidsdaling optreedt.

2.3.4. Evaluatie

Zoals al eerder gesteld is de situatie in een verkeersstroom waarbij geen inhalen voorkomt relatief eenvoudig. Uit de behandelde modellen blijkt echter dat men toch sterk moet schematiseren (alle snelheden gelijk, onmiddellijk snelheidsveranderingen, e.d.) teneinde met analytische technieken resultaten te kunnen bereiken. Het is dan ook de vraag hoe de, nog niet uitgevoerde, vergelijking met de realiteit voor de modellen zal uitvallen. Meer mogelijkheden bieden microscopische simulatiemodellen (zie Deel VIII), waarbij meer reële veronderstellingen mogelijk zijn. De "analytische" modellen zijn daarbij nuttig als ondersteuning. Ze kunnen richting geven bij de keuze van de te simuleren gevallen, zijn bruikbaar bij de controle van het simulatieprogramma én bij de vaststelling van het benodigde aantal te simuleren voertuigen.

2.4. Eenrichtingsverkeer op meer dan een rijstrook

Deze situatie komt voor op hoofdaders, zowel binnen als buiten de bebouwde kom. De modellen zijn vooral van toepassing te achten voor vrij lange aders, dus voor wegen buiten de bebouwde kom, waaronder de autosnelwegen. In het algemeen

is de inhaalmanoeuvre in dit geval voor bestuurders veel gemakkelijker dan wanneer met tegenliggers rekening moet worden gehouden. Dit is wellicht de verklaring voor het feit dat er relatief weinig aandacht aan deze situatie is besteed in vergelijking met die op een enkelbaans tweestrooksweg, terwijl in het algemeen verkeersstroommodellen meer op autosnelwegen gericht zijn. Er zijn twee soorten modellen in de literatuur aangetroffen:

2.4.1. "Miller" model

Gebhardt (1972) en Andrews (1973) hebben een bepaalde wijze van beschrijven, die geïntroduceerd is door Miller (1961), toegepast op een rijbaan van een autosnelweg. Uitgangspunten zijn hierbij:

- elk voertuig wordt gekenmerkt door een wensnelheid, waarmee het rijdt als het de leider van een cluster is;
- voertuigen rijden in clusters, gekenmerkt door omvang en snelheid van de leider; de clusters zijn voor wat betreft hun positie, omvang en snelheid onafhankelijk van elkaar;
- het aantal ontmoetingen van twee soorten clusters is evenredig met hun dichtheden en snelheidsverschil;
- voertuigen verlaten clusters volgens een Poissonproces, waarvan de intensiteit afhankelijk gesteld kan worden van kenmerken van het voertuig, het cluster en de verkeersstroom op de andere rijstrook;
- snelheidsveranderingen gebeuren ogenblikkelijk;
- clusters hebben geen afmetingen.

Op grond hiervan kunnen vergelijkingen opgesteld worden die beschrijven hoe de aantallen clusters van zekere omvang per eenheid van tijd veranderen. Zo zal het aantal clusters van de omvang 1 dalen door het aansluiten (van achteren) van een voertuig bij een cluster en omgekeerd, terwijl het groeit als voertuigen uit een cluster ontsnappen. Het aantal clusters van de omvang n zal op de drie bovengenoemde wijzen kunnen dalen en groeien door samenvoeging van clusters van

de omvang j en $n-j$, met $j = 1, 2, \dots, n-1$. Hierbij kan ook nog nog onderscheiden worden naar verschillende snelheden.

In totaal ontstaat zodoende een complex stelsel differentiaalvergelijkingen, waarvan de parameters nog gespecificeerd moeten worden. Zo zal op een enkelbaans tweestrooksweg de "ontsnappingsintensiteit" afhangen van clusterkenmerken, wensnelheid, kenmerken van de stroom tegenliggers en zichtafstanden. Op een rijbaan voor één richting wordt het laatste vervangen door de kenmerken van de stroom "meeliggers". Teneinde de vergelijkingen hanteerbaar te houden moeten de diverse afhankelijkheden relatief eenvoudig gekozen worden.

Ter illustratie iets meer over het door Gebhardt opgestelde model. Ter vereenvoudiging wordt aangenomen dat op de linkerrijstrook van de tweestrooksrijbaan de clusteromvang maximaal drie is en de toestand homogeen en stationair is, dat wil zeggen macroscopische en mesoscopische kenmerken zijn constant in plaats en tijd. Het gaan naar de rechterstrook wordt afhankelijk gesteld van de wensnelheid, de benodigde ruimte (hierbij wordt een veiligheidsmarge geïntroduceerd) en de beschikbare.

Het feit dat een voertuig, ondanks dat het volgens de condities mogelijk is, praktisch niet altijd naar rechts gaat, wordt gemodelleerd met een kans op uitvoering. Voor het van rechts naar links gaan geldt ongeveer hetzelfde, echter deze manoeuvre wordt altijd uitgevoerd als aan de condities voldaan is.

Uit een summiere vergelijking met reële verkeersgegevens blijkt dat het model de verdeling van de rijbaanintensiteit over de rijstroken en het basisdiagram (gemiddelde snelheid als functie van intensiteit) goed voorspelt, tot aan een rijbaanintensiteit van 1500 vtg/h.

Het model van Andrews is nog niet vergeleken met empirische gegevens, reden het hier verder buiten beschouwing te laten.

2.4.2. Model van Rørbech

Bij veel verkeersstroommodellen is het een nadeel dat de toetsing er van moeilijk uitvoerbaar is. Rørbech (1974) ondervangt dit door zijn model en een praktisch uitvoerbare meetmethode van begin af aan op elkaar af te stemmen.

Een verkeersstroom op een tweestrooksrijbaan van een autosnelweg wordt op een aantal raaien (= wegdoorsneden), op vrij korte afstanden van elkaar gelegen (100 m), geobserveerd met behulp van sensoren op de rijbaan. Geregistreerd worden van elk passerend voertuig: laterale positie, d.w.z. rijstrook; passagemoment; snelheid; wielbasis. Dit maakt het mogelijk de gegevens van dezelfde voertuigen op verschillende raaien bij elkaar te zoeken. Het gedrag van een voertuig op een raai wordt geklasseerd in 4 categorieën, nl. de combinatie van rijstrook en al of niet in cluster rijden; aangeduid met 1F, 1K, 2F, 2K (F = niet en K = wel in cluster). Of een voertuig al of niet in een cluster rijdt wordt afhankelijk gesteld van: laterale positie (rijdt een voertuig op 2 rijstroken dan behoort het niet tot een cluster); snelheid, netto volgtijd, snelheid van voorligger; veronderstelde responsietijd en remvertraging. Een verzameling passerende voertuigen wordt nu gekenmerkt door de frequenties waarmee de diverse toestanden voorkomen. Deze worden opgevat als de realisaties van een stochastisch proces, er is dus sprake van een kansverdeling over toestanden. Koppeling van de gegevens van twee raaien maakt het mogelijk overgangskansen van de ene naar de andere toestand te definiëren en te bepalen. Verondersteld wordt nu dat de toestandsveranderingen verlopen volgens een Markov proces, d.w.z. de toestand op raai i is alleen afhankelijk van de toestand op de eerste stroomopwaarts gelegen raai j en de overgangskansen. Bovendien wordt het proces homogeen verondersteld, d.w.z. de kansverdeling over de toestanden is constant voor alle raaien.

Bij toetsing blijkt dit model goed te passen op een verkeersstroom met vrijwel uitsluitend personenauto's, bij drie ver-

schillende intensiteiten en bij een raaiafstand van 100 m.

Model en data samen maken het mogelijk de toestandverdeling te schatten (inter- en extrapolatie) voor intensiteiten vanaf nul tot aan de capaciteit (bij afwikkelingsniveau A t/m E); zie Afbeelding 6. De mate van vrij en in cluster rijden ligt dan kwantitatief vast, hetgeen een verbetering betekent ten opzichte van de kwalitatieve omschrijving van de mate van manoeuvre-vrijheid in de Highway Capacity Manual (HRB, 1965).

Tevens valt het basisdiagram, d.w.z. de bovenste tak van de curve gemiddelde snelheid als functie van intensiteit, af te leiden. Daartoe wordt een schatting gemaakt van de verdeling van de wenssnelheden, de snelheid bij de capaciteit en de snelheid in de clusters bij diverse intensiteiten. Het totale resultaat geeft enigszins hogere snelheden aan dan een uitvoerige verzameling geobserveerde waarden.

Tenslotte wordt beredeneerd dat de weg bij lage intensiteit in feite slecht benut wordt, omdat er dan al vrij veel clusters op de rechterstrook voorkomen. Ontsnappen hieruit is moeilijk ten gevolge van de (geringe aantallen) snelle voertuigen die vrijwel permanent de linkerstrook gebruiken. Een maximum snelheid zou deze situatie kunnen verbeteren, waarbij het zelfs mogelijk is dat de gemiddelde snelheid ook bij lage intensiteit vrijwel niet daalt. Het feit dat bij hoge intensiteiten de meerderheid van de voertuigen de linkerrijstrook berijdt wordt mede verklaard door een verschil in wachtrijdiscipline tussen beide stroken. Op de rechterrijstrook geldt LIFO (last in, first out), het laatste voertuig van een cluster kan het eerste ontsnappen, en op de linkerrijstrook FIFO (first in, first out).

2.4.3. Evaluatie

Het "Miller" model, zoals uitgewerkt door Gebhardt, is nog slechts in beperkte mate vergeleken met de realiteit. In

grote trekken geldt hiervoor hetzelfde als voor de modellen voor tweerichtingsverkeer op twee rijstroken is opgemerkt (zie par. 2.2.3.).

De betekenis van het model van Rørbech is voornamelijk dat het een beschrijving biedt van het gedrag van een verkeersstroom, wat gedetailleerder dan alleen met intensiteit en gemiddelde snelheid, die (in tegenstelling tot de meeste andere mesoscopische modellen) betrekkelijk eenvoudig toetsbaar is. Het model is mogelijk bruikbaar bij vaststelling van het effect van speciale wegkenmerken (bruggen, hellingen) en maatregelen (verlichting, snelheidslimieten), wat echter uit nader onderzoek zal moeten blijken. Een principiële vraag is nog in hoeverre de door Rørbech gebruikte meetmethode, met zichtbare sensoren op de weg, de te meten grootheden beïnvloedt.

2.5. Dispersiemodellen

Bij onderbroeken verkeersstromen ten gevolge van met verkeerslichten geregelde kruispunten rijden de voertuigen veelal in groepen van kruising naar kruising. Indien men de lichtenregeling van de verschillende kruispunten wil coördineren, met bijvoorbeeld als doel de wachttijd of het aantal stops te verminderen, wordt het van belang te weten hoe de groepen voertuigen zich gedragen. Het gaat hierbij voornamelijk om de mate waarin de groepen voertuigen toenemen in omvang (in ruimte of tijd uitgedrukt) bij het rijden over een wegvak. Dit verleggen of uiteen vallen van de clusters wordt meestal met de aan de fysica ontleende termen dispersie of diffusie aangeduid (in het Duits Pulkaauflösung). In het algemeen gaat het hierbij om hoofdaders met per rijrichting voldoende ruimte om inhalen, in meer of mindere mate, mogelijk te maken.

Voor het verschijnsel dispersie zijn diverse modellen opgesteld, o.a. vergeleken door Seddon (1971 en '72) m.b.v. data.

A. Toepassing golventheorie van Lighthill en Whitham

Intensiteiten (en dichtheden) planten zich voort met een snelheid die bepaald wordt door de helling van het basisdiagram (intensiteit als functie van dichtheid) bij de betreffende intensiteit. Zie voor deze theorie Deel IV van het rapport, waar ook reeds gesteld is dat de toepassing voor dit geval niet tot juiste resultaten leidt.

B. Diffusiemodel

De uitgangspunten zijn dat alle voertuigen met een konstante snelheid rijden en elkaar niet beïnvloeden. Stel op raai 1 is het intensiteitsverloop $q_1(t)$ en de kansdichtheid van de reistijden $g(r)$, dan geldt op een stroomafwaarts gelegen raai 2:

$$q_2(t) = \int q_1(t-r) g(r) dr \quad \text{met integratie van minimale tot}$$

maximale reistijd. Hoewel de uitgangspunten duidelijk niet realistisch zijn blijkt dit model toch vrij goed te voldoen. Bovendien blijkt de vorm van de kansdichtheid van de reistijd, mits het gemiddelde klopt, weinig effect te hebben, zodat met de eenvoudige rechthoekige dichtheid kan worden volstaan; zie Tracz (1975).

C. Recurrente betrekking

Gesteld wordt dat geldt: $q_2(i) = (1-F)q_2(i-1) + Fq_1(i-2)$

met $q_2(i)$ = intensiteit in i^e tijdsinterval op raai 2, $r = 0,8$ maal de gemiddelde reistijd tussen raai 1 en raai 2, gewichtsfactor $F = 1/(1+r/2)$. In feite is deze methode een bijzondere vorm van het diffusiemodel, die vrij goede resultaten levert.

Bovenstaande modellen worden gebruikt bij het ontwerpen van verkeerslichtenregelingen. Het derde is bijvoorbeeld onderdeel van de berekeningsmethode Transyt (zie Robertson, 1969), voor het bepalen van een optimale regeling. Treiterer et al (1973) gebruiken het tweede model als onderdeel van een simu-

latie van het verkeersverloop op mesoscopisch niveau op opeenvolgende kruispunten. Wiedemann (1969) vindt de nauwkeurigheid van het diffusiemodel te gering en stelt op grond hiervan een microscopisch simulatiemodel op. Dit type modellen zal in Deel VIII van dit rapport aan de orde komen.

Een goed ontworpen gecoördineerde verkeerslichtenregeling zal de kwaliteit van het verkeer dienen te verbeteren. In eerste instantie wordt daarbij als criterium vlothed (reistijd, aantal stops, e.d.) beschouwd. Echter ook externe effecten als geluidhinder en luchtverontreiniging kunnen er door beïnvloed worden, en ten slotte ook veiligheid. Het valt buiten het kader van dit rapport de relatie tussen verkeerslichtenregelingen en kwaliteiten van het verkeer te behandelen; verwezen kan worden naar OECD (1972). Voor wat betreft de veiligheid worden positieve effecten genoemd door Camkin & Lowrie (1972) en Clark & Ogden (1973).

Evaluatie

De behandelde modellen kunnen gerekend worden tot het type black box, waarbij de veronderstellingen omtrent het voertuiggedrag of niet realistisch (diffusiemodel) of niet expliciet (recurrente betrekking) zijn. Ze blijken voor het beperkte doel waarvoor ze opgesteld zijn vrij goed bruikbaar. De betekenis van de modellen moet gevonden worden in de verkeersregeltechniek, waar ze bij het ontwerp van verkeerslichtenregelingen gebruikt worden.

3. BOLTZMANNMODELLEN

3.1. Inleiding

Centraal in dit type modellen staat de snelheidsverdeling, die beschouwd wordt als functie van plaats en tijd. Uitgangspunt is de snelheidsverdeling bij zeer geringe voertuigdichtheid, waarbij alle voertuigen met hun wensnelheid rijden en er nog geen interactie tussen de voertuigen is. De wensnelheden kunnen afhankelijk zijn van weg-, voertuig- en bestuurderskenmerken en omstandigheden. Bij grotere dichtheid ontstaan er processen in de verkeersstroom die leiden tot veranderingen in de snelheidsverdeling. Voor deze processen worden betrekkelijk eenvoudige modellen opgesteld, waarvan de parameters nog een functie van de dichtheid zijn. Zodoende ontstaat een model waarbij de snelheidsverdeling "verklaard" wordt in termen van de wensnelheidsverdeling en de dichtheid.

Het model is opgesteld voor de situatie op een rijbaan van twee of meer rijstroken voor verkeer in één richting. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen de rijstroken. De wegkenmerken zijn geen functie van de plaats (homogene weg) en er zijn geen kruisingen, toe- en afritten. Deze situatie komt voornamelijk voor op een rijbaan van een autosnelweg.

De naam Boltzmannmodellen is ontleend aan de statistisch-mechanische beschouwingen van stelsels deeltjes (gassen) waarbij de Boltzmann-vergelijking een belangrijke rol speelt. Hieruit moet niet worden geconcludeerd dat bij deze verkeersstroommodellen wordt gesteld dat moleculen in een gas hetzelfde gedrag vertonen als voertuigen in een verkeersstroom. De overeenstemming is dat in beide gebieden de snelheidsverdeling centraal staat en dat ten dele dezelfde technieken bruikbaar zijn.

Ontwikkeling van deze soort modellen is omstreeks 1960 begonnen en voornamelijk uitgevoerd door Prigogine en Herman. De theorie is samengevat in Prigogine & Herman (1971); belangrijke evaluaties er van zijn geleverd door Munjal & Pahl (1969) en Paveri-Fontana (1975).

3.2. Het model

Noem de kansdichtheid van de snelheden $f(v,x,t)$, d.w.z. dat $f(v,x,t) dv dx$ evenredig is met het verwachte aantal voertuigen ten tijde t , ter plaatse $(x,x+dx)$ en met snelheden in het interval $(v,v+dv)$. Verondersteld wordt dat f verandert ten gevolge van drie processen:

- a) Interactie. Voertuigen kunnen niet altijd meteen inhalen, moeten dan snelheid verminderen en daardoor verandert f .
- b) Relaxatie. Als voertuigen de mogelijkheid hebben zullen ze hun snelheid verhogen tot de wenssnelheid. Dit gebeurt geleidelijk.
- c) Aanpassing. Behalve dat voertuigen er naar streven hun wenssnelheid te rijden zullen ze, vooral bij grote dichtheid, ook enigszins streven naar de gemiddelde snelheid. Overigens wordt het aanpassingsproces niet altijd in het model opgenomen.

Wiskundig geformuleerd luidt het model als volgt:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -v \frac{\partial f}{\partial x} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{interactie}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{relaxatie}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{aanpassing}}$$

De eerste term in het rechter lid representeert voertuigen met een constante snelheid.

De drie processen worden als volgt gespecificeerd:

$$a) \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{int}} = k(1-P)(\bar{v}-v)f$$

De interactie is evenredig met de dichtheid k , met de kans dat passeren niet meteen mogelijk is $1-P$, met de afwijking van de gemiddelde snelheid \bar{v} , en met de kansdichtheid zelf. P is een functie van de dichtheid; gesteld wordt $P = 1-k/k_s$

met k_s = stremmingsdichtheid. De keuze van deze functie is voorlopig en niet essentieel voor het totale model omdat ze gemakkelijk door een andere kan worden vervangen.

Het model voor de interactie is gebaseerd op de volgende veronderstellingen:

- voertuigen hebben geen afmetingen;
- de eventuele snelheidsdaling gebeurt sprongsgewijs;
- alleen interacties van twee voertuigen worden beschouwd, dus nog geen noemenswaardige clustervorming;
- posities en snelheden van verschillende voertuigen zijn onafhankelijk (deze veronderstelling lijkt strijdig met het begrip interactie en is een zwak punt van het model);

$$b) \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{rel}} = - (f - f_0) / T$$

De relaxatie is evenredig met de afwijking van de kansdichtheid van de wenssnelheden f_0 en verloopt met een zgn. relaxatietijd T . Deze veronderstelling impliceert dat, afgezien van de andere processen, f exponentieel tot f_0 nadert. Van T wordt aangenomen dat het een functie van P , en daarmee dus weer van dichtheid, is; $T = T_0(1-P)/P$. De keuze van deze functie is weer niet zo essentieel voor het totale model.

$$c) \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{aan}} = - \lambda k(1-P) \left[f - k \delta(\bar{v} - v) \right]$$

Dit betekent dat, afgezien van de andere processen, f exponentieel tot het product van dichtheid en deltafunctie $\delta(\cdot)$ nadert, waarbij alle snelheden gelijk zijn, met een relaxatietijd $1/[\lambda k(1-P)]$. Het proces is mede gebaseerd op een analyse van het volggedrag in een verkeersstroom, waarvoor een aantal modellen zijn opgesteld; zie Deel VIII. Hierbij wordt aangenomen dat de achterligger zijn snelheid aanpast aan die van de voorligger.

Parameter λ , eventueel nog afhankelijk van de dichtheid, geeft aan in welke mate het aanpassingsproces een rol speelt.

Zodoende wordt de totale modelvergelijking:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -v \frac{\partial f}{\partial x} + k(1-P)(\bar{v}-v)f - (f-f_0)/T - \lambda k(1-P) [f - k \delta(\bar{v}-v)]$$

Dit is een niet-lineaire differentiaal-integraalvergelijking voor de functie f , die in het algemeen alleen numeriek opgelost kan worden. (Het is een integraalvergelijking omdat $\bar{v} = \int v f dv$ er in voorkomt.)

3.3. Homogene en stationaire toestand

De eerste stap bij onderzoek van het model, zowel op papier als bij vergelijking met de realiteit, is het beschouwen van de homogene en stationaire toestand, dus met resp. $\partial f / \partial x = 0$ en $\partial f / \partial t = 0$. In dat geval is f de oplossing van de integraalvergelijking:

$$f = \frac{f_0 + \lambda \beta k \delta(\bar{v}-v)}{1 - \beta(\bar{v}-v) + \lambda \beta} \quad \text{met} \quad \beta = k T(1-P)$$

Substitueert men de gekozen functies $T(P)$ en $P(k)$ dan volgt:

$$\beta = T_0 k^3 / [k_s^2 (1 - k/k_s)]$$

Gegeven de kansdichtheid van de wensnelheden f_0 , de dichtheid k , en daarmee β , en de parameter λ is f te bepalen door oplossing van de integraalvergelijking. Dit betekent dus o.a. een voorspelling van het verloop van gemiddelde snelheid en variantie van de snelheden als functie van de dichtheid, die experimenteel toetsbaar is.

Door Prigogine & Herman (1971) zijn een aantal gevallen doorerekend met $\lambda = 0$, dus zonder aanpassingsproces, voor diverse keuzen van f_0 . Het blijkt dan dat er twee gevallen moeten worden onderscheiden:

$$\beta \bar{v} < 1 \quad f = f_0 / [1 - \beta(\bar{v}-v)] \quad (i)$$

$$\beta \bar{v} \geq 1 \quad f = f_0 / (\beta v) + \alpha k \delta(v) \quad (ii)$$

met α een nog nader te specificeren parameter als functie van de dichtheid.

Vanaf dichtheid 0 geldt eerst (i); omdat β stijgt en \bar{v} daalt met toenemende dichtheid wordt $\beta \bar{v} = 1$ meestal bereikt als $k < k_s$. Vanaf die dichtheid geldt (ii) en staat het deel αk van de voertuigen stil. Bovendien is dan de gemiddelde snelheid onafhankelijk van f_0 . De situaties beschreven door (i) en (ii) worden resp. "individual flow" en "collective flow" genoemd.

De resultaten die zo bereikt worden zijn kwalitatief niet onaanvaardig. De keuze van de diverse f_0 's is echter nogal merkwaardig, in die zin dat zeer kleine of zelfs aan nul gelijk zijnde wenssnelheden met eindige kans voorkomen.

Een analyse van de stabiliteit leidt Prigogine tot de conclusie dat vanaf een zekere dichtheid instabiliteiten optreden, zodat het bovenstaande dan in feite geen goede beschrijving meer kan zijn. Op grond van het feit dat bij de opstelling van het model diverse malen veronderstellingen gemaakt zijn die alleen bij kleine dichtheid realistisch lijken, komen Munjal & Pahl (1969), in een theoretische evaluatie, tot de conclusie dat het totale model hoogstens tot aan een zekere dichtheid geldig kan zijn.

Meer recent is fundamentele kritiek geleverd op het bestaande Boltzmanmodel door Pavari-Fontana (1975). Deze beschouwt het model zonder aanpassingsproces en bij geringe dichtheden. Hoewel het model voor deze situatie het meest geschikt lijkt, blijkt het toch in eenvoudige gevallen tot zeer onrealistische uitkomsten te leiden. Dit motiveert de auteur tot het opstellen van een alternatief model (zie par. 3.5.).

3.4. Toetsingen

De geldigheid van het model, ook in het eenvoudige homogene stationaire geval, is nog maar zeer beperkt onderzocht.

- Gafarian et al (1971) komen tot de conclusie dat de voorspelde snelheidskansdichtheid slecht met de realiteit overeenkomt, zowel met als zonder aanpassingsterm in het model.
- Herman et al (1971) reageren op het bovenstaande en stellen dat niet de kansdichtheden zelf vergeleken moeten worden (di is te veel gevraagd) maar de minder voor de vorm gevoelige momenten van de snelheidsverdeling. Op grond van o.a. dezelfde data als Gafarian komen zij tot een licht positieve uitspraak voor de theorie.

Opm. Op grond van de reeds genoemde theoretische bezwaren tegen het model leek het niet nodig de toetsingen uitvoerig te behandelen.

3.5. Alternatieve modellen

Munjal et al (1972) komen op grond van theoretische bezwaren en de resultaten van Gafarian's toetsing tot de volgende variant van het oorspronkelijke Boltzmanmodel. De kansdichtheid van de wensnelheden is niet meer constant maar verschuift naar lagere snelheden met toenemende dichtheid. Het interactieproces blijft gehandhaafd, wat leidt tot de vergelijking:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -v \frac{\partial f}{\partial x} + k(1-P)(\bar{v}-v)f - (f-\tilde{f})/T$$

met $\tilde{f}(v) = \lambda f_0(\lambda v)$ en parameter λ stijgend van 1 tot ∞ bij toenemende dichtheid.

Dit model blijkt in de homogene en stationaire situatie in een onderzocht geval veel beter te passen dan het originele Boltzmanmodel. Tevens blijkt echter dat ook een model, waarin uitsluitend de snelheidskansdichtheid verschuift, vrijwel even goed past. Dit eenvoudige model heeft de vergelijking:

$$f(v) = (\bar{v}_0/\bar{v}) f_0(v\bar{v}_0/\bar{v})$$

Hierin zijn \bar{v} en \bar{v}_0 de gemiddelde snelheden die horen bij respectievelijk de kansdichtheden f en f_0 .

De voorlopige conclusie is dat de homogene en stationaire situatie tot aan een zekere dichtheid met een vrij eenvoudig model beschreven kan worden.

Paveri-Fontana (1975) komt op grond van de eerder genoemde fundamentele kritiek juist tot een complexer model. De auteur stelt een vergelijking op voor de simultane kansdichtheid g van snelheid v en wenssnelheid w als functie van plaats en tijd; d.w.z. $g(v,w,x,t) dv dw dx$ is evenredig met het verwachte aantal voertuigen ten tijde t , ter plaatse $(x,x+dx)$, met wenssnelheden $(w,w+dw)$ en snelheden $(v,v+dv)$. De modelvergelijking wordt:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -v \frac{\partial g}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{w-v}{T} g \right) + f(x,v,t) \int_v^{\infty} (1-P)(v'-v) g(v',w,x,t) dv' \\ - g(v,w,x,t) \int_0^v (1-P)(v-v') f(v',x,t) dv'$$

$$\text{met } f(v,x,t) = \int_0^{\infty} g(v,w,x,t) dw$$

$$\text{en } f_0(w,x,t) = \int_0^{\infty} g(v,w,x,t) dv$$

Consequenties van dit model zijn nog maar in beperkte mate beschouwd. Het zou geldig kunnen zijn tot aan een zekere dichtheid.

3.6. Evaluatie

- Het zal uit het bovenstaande duidelijk zijn dat van het model nog geen toepassingen bekend zijn. Potentieel is het bruikbaar voor het verkrijgen van meer inzicht in het snelheidsgedrag van voertuigen in een verkeersstroom. Meer specifiek kan er o.a. een model voor het basisdiagram en voor het verloop van de variantie van de snelheden met de dichtheid uit afgeleid worden.

- Vooralsnog is echter de geldigheid van dit type model nog niet aangetoond. De vraag kan zelfs gesteld worden of toetsing eigenlijk wel mogelijk is. Voor de homogene en stationaire situatie en voor betrekkelijk langzame veranderingen

gen vermoedelijk wel. Bij snelle veranderingen verliest echter de snelheidsverdeling als karakterisering van de verkeersstroom aan praktische betekenis, omdat voor het betrouwbaar vaststellen er van vrij veel voertuigen nodig zijn. Hier ligt een belangrijk verschil met de situatie bij bv. gassen, waarbij voldoende deeltjes aanwezig zijn in volumina van afmetingen die relevant zijn voor wat men wil beschrijven.

- Verder valt op dat het model nogal complex en moeilijk te hanteren is, hoewel de veronderstelling omtrent de interacties relatief eenvoudig zijn gehouden.

- Het is een bezwaar dat het verschil in snelheidsgedrag tussen de rijstroken geheel in het model verborgen is.

- Samenvattend is het oordeel over de Boltzmannmodellen nogal negatief. Voor dat ze eventueel bruikbaar worden moet nog veel onderzoek gedaan worden. Men kan zich afvragen of microscopische simulatiemodellen niet een geschikt alternatief zijn. Ook dan ontstaat een complex geheel en is de hanteerbaarheid een probleem, echter de hele opzet en werking van het model is veel doorzichtiger.

4. SLOTBESCHOUWING

De behandelde modellen geven een beschrijving van het gedrag van een verkeersstroom in termen van mesoscopische verkeersstroomkenmerken, voornamelijk snelheden en clusters, wanneer er zoveel verkeer is dat de interacties tussen de voertuigen van belang worden. Daarbij worden meestal de volgende beperkingen in acht genomen:

- de weg is homogeen, d.w.z. het gaat om aders met constante wegkenmerken en zonder kruisingen, toe, af- en uitritten;
- de dichtheid blijft onder de kritische, d.w.z. de waarde die optreedt als de intensiteit gelijk aan de capaciteit is;
- de toestand is in evenwicht, d.w.z. macroscopische en mesoscopische kenmerken van de verkeersstroom zijn constant.

(De laatste twee punten gelden niet voor de, minder belangrijke, modellen voor eenrichtingsverkeer op een rijstrook en de dispersiemodellen.)

Er zijn nogal veel modellen opgesteld maar er is weinig onderzoek verricht naar de geldigheid. Een belangrijke reden hiervoor zijn de grote inspanningen die nodig zijn voor het verzamelen van de reële verkeersgegevens. Gegeven dit feit kan men ook deze beperking meteen in acht nemen en slechts modellen ontwikkelen waarvoor wel betrekkelijk eenvoudig data te verzamelen zijn. Een voorbeeld hiervan is het behandelde model van Rørbech. Als men de modellen uitbreidt naar dynamische situaties, waarbij niet meer van een evenwicht sprake is, wordt het zelfs de vraag of toetsingsonderzoek in principe uitvoerbaar is.

Een geschikt hulpmiddel bij de opstelling en eerste verkenning van de diverse modellen is vermoedelijk een simulatie van de verkeersstroom op microscopisch niveau. De veronderstellingen die daar voor nodig zijn hebben t.o.v. de "mesoscopische hypothesen" het voordeel dat ze doorzichtiger zijn. Het is ook mogelijk dat men op die manier een goed alternatief voor de mesoscopische modellen zal vinden.

Het nut van de behandelde verkeersstrommodellen is in principe dat ze een hanteerbare beschrijving vormen van bepaalde verschijnselen in een verkeersstroom. Dit maakt het mogelijk ze te gebruiken bij het ontwerp en de evaluatie van maatregelen die bedoeld zijn de kwaliteit van de verkeersstroom te verbeteren, met name van de kwaliteitsaspecten reistijd en veiligheid. Daarbij is overigens het eerst genoemde kwaliteitsaspect wel veel eenvoudiger "grijpbaar" dan het tweede. Als voorbeelden van maatregelen waarvoor het bovenstaande geldt kunnen worden genoemd: snelheidslimieten, inhaalverboden, geometrische veranderingen (zichtafstanden, extra kruipstrook). Zolang het onderzoek naar de geldigheid van de diverse modellen echter nog maar zo beperkt is uitgevoerd als beschreven verdienen de toepassingen slechts de qualificatie potentieel.

AFBEELDINGEN

Nr. Bijschrift

- 1 Model voor het verloop van de zichtlengte langs een weg. Bron: Gustavsson (1967).

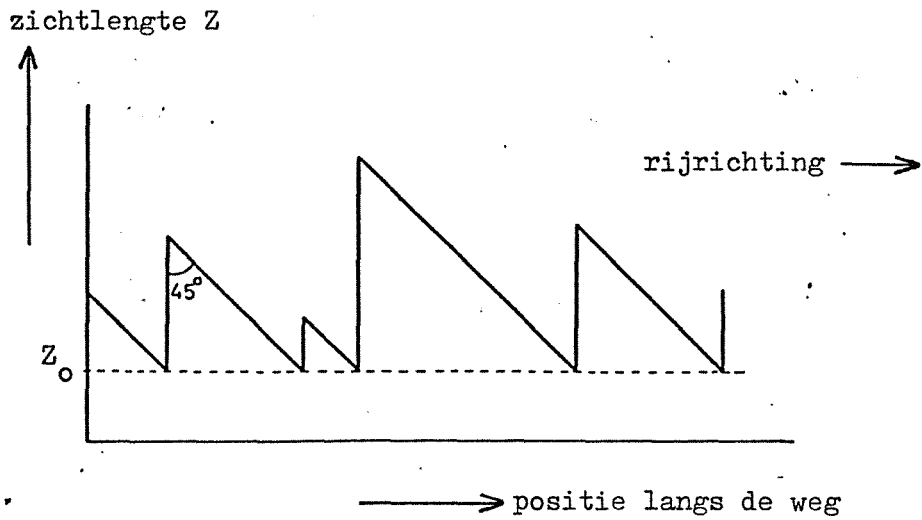
- 2 Geobserveerd verloop van de zichtlengte langs een weg. Bronnen: Gustavsson (1967) en Erlander (1971).

- 3 Voertuigtrajectoriën bij clustervorming volgens het model van Cowan. Bron: Cowan (1971).

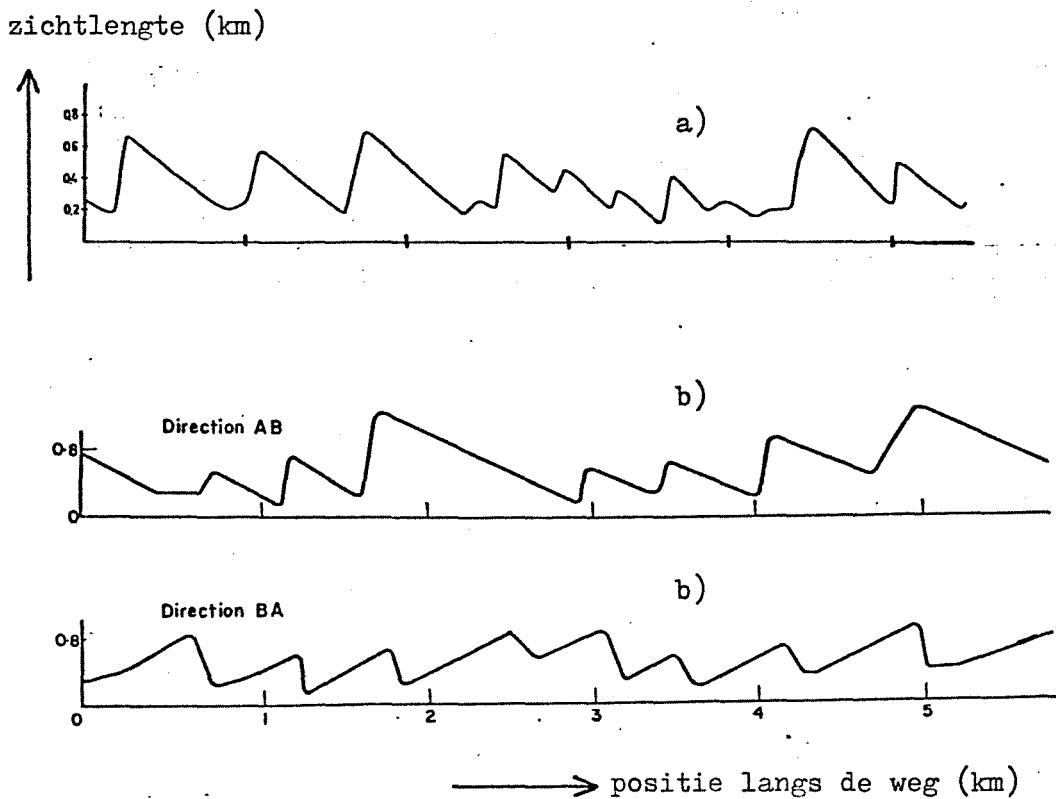
- 4 Voertuigtrajectorieën bij het uiteenvallen van clusters volgens het model van Newell. Bron: Newell (1959).

- 5 Voertuigtrajectorieën bij groei en afbraak van een file volgens het model van McNeil. Bron: McNeil (1969).

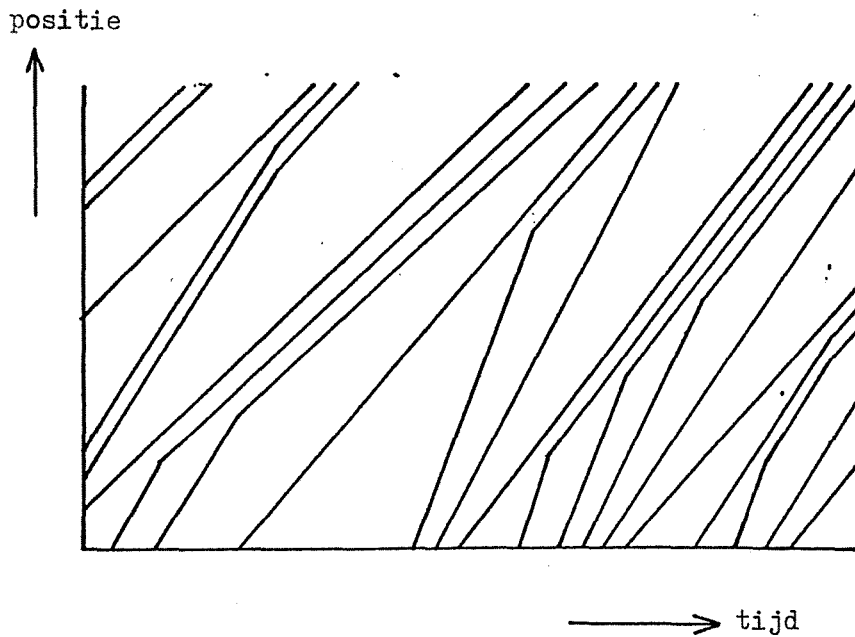
- 6 Toestandsverdeling als functie van de intensiteit en het corresponderende afwikkelingsniveau. Bron: Rørbech (1974).



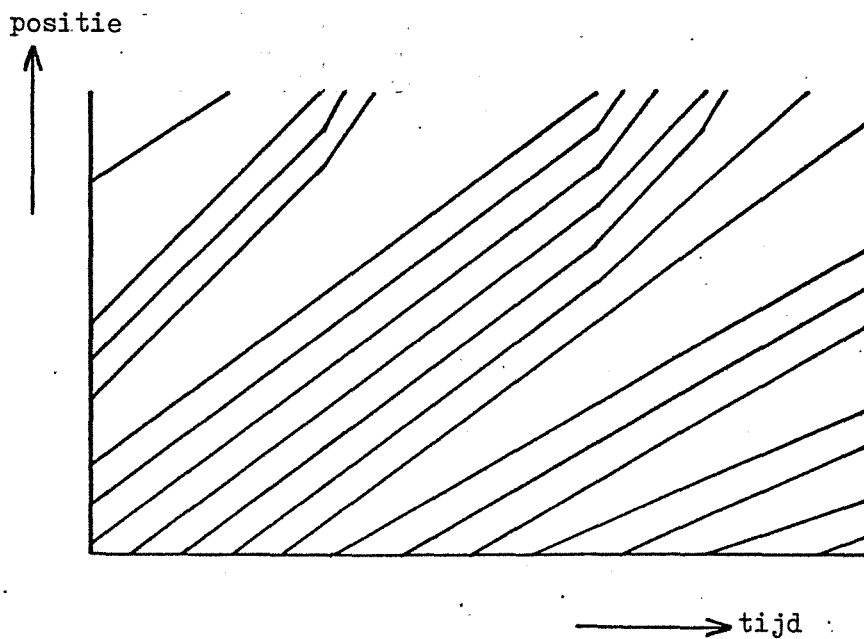
Afbeelding 1. Model voor het verloop van de zichtlengte langs de weg.
Bron: Gustavsson (1967).



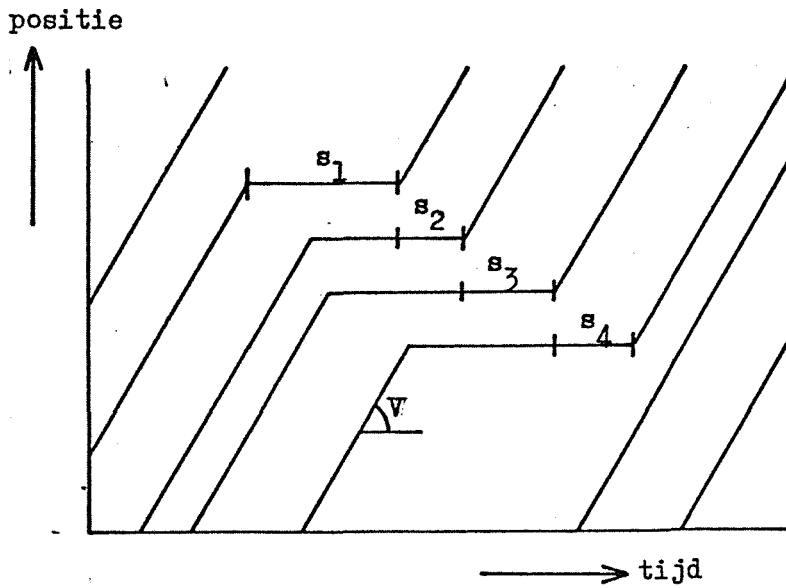
Afbeelding 2. Geobserveerd verloop van de zichtlengte langs een weg.
Bronnen: a) Gustavsson (1967) b) Erlander (1971).



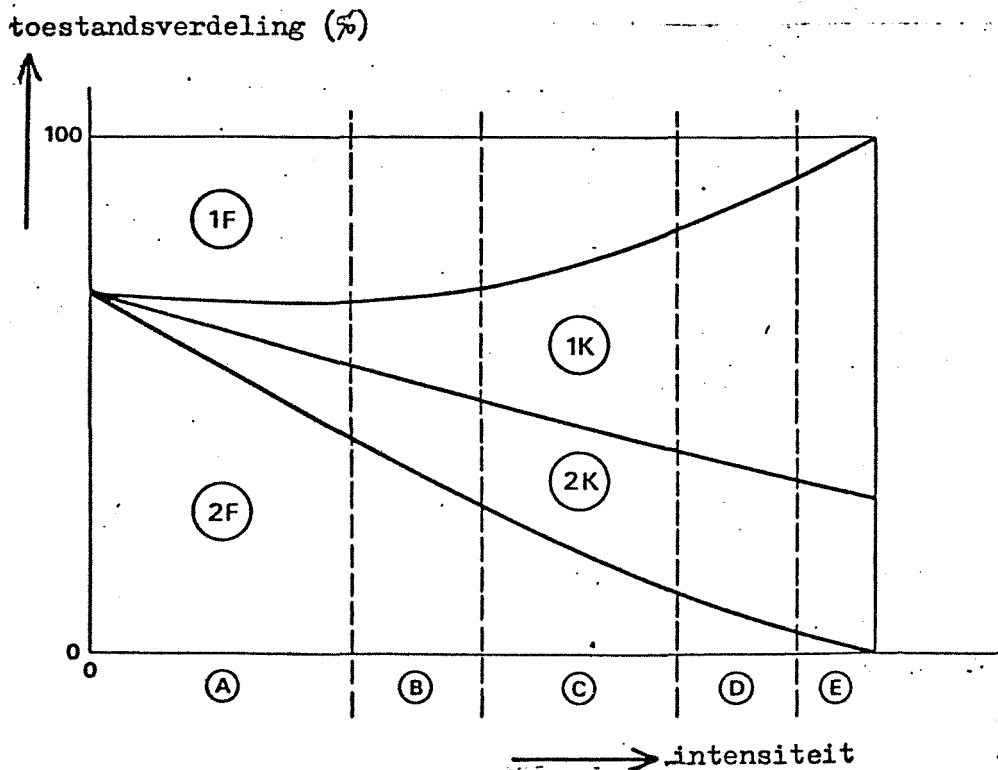
Afbeelding 3. Voertuigtrajectoriën bij clustervorming volgens het model van Cowan. Bron: Cowan (1971).



Afbeelding 4. Voertuigtrajectoriën bij het uiteenvallen van clusters volgens het model van Newell. Bron: Newell (1959).



Afbeelding 5. Voertuigtrajectoriën bij groei en afbraak van een file volgens het model van McNeil. Bron: McNeil (1969).



Afbeelding 6. Toestandsverdeling als functie van de intensiteit en het corresponderende afwikkelingsniveau. Bron: Rørbech (1974).

LITERATUUR

- Andrews, F.C. A statistical theory of traffic flow on highways. Part IV Semi-empirical steady state theory. *Transportation Research* 7 (1973). 3 : 235-241.
- Brill, E.A. Model of a traffic jam behind a bottleneck. *Operations Research* 20 (1972) 4 : 791-799.
- Brilon, W. Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstrassen. Technische Universität, Karlsruhe, 1974.
- Camkin, H.L. & Lowrie, P.R. The effect of co-ordinated traffic signal systems on traffic accidents. In: National Road Safety Symposium, Canberra, 257-262, 1972.
- Clark, N.C. & Ogden, K.W. A review of traffic control devices in relation to road safety. Australian Government Publishing Service, Canberra, 1975.
- Cowan, R.J. A road with no overtaking. *Australian J.o. Statistics* 13 (1971) 2 : 94-116.
- Epstein, B., Galin, D., Shlifer, E. Behaviour of vehicles along roads for which passing is not permitted. *Transportation Research* 8 (1974) 6 : 517-522.
- Erlander, S. A mathematical model for traffic on a two-lane road with some empirical results - II Empirical results. *Transportation Research* 5 (1971) 2 : 149-175.
- Gafarian, A.V., Munjal, P.K., Pahl, J. An experimental validation of two Boltzmanmodel-type statistical models for multi-lane traffic flow. *Transportation Research* 5 (1971) 3 : 211-224.
- Galin, D. & Epstein, R. Speeds and delays on two-lane roads, where passing is possible at given points of the road. *Transportation Research* 8 (1974) 1 : 29-37.
- Gebhardt, D. Ein analytisches Warteschlangenmodell für den Verkehr auf Autobahnen. *Zeitschrift für Operations Research* 16 (1972) : 57-71.
- Gustavsson, J. A model for overtaking on a two-lane road with limited visibility. In: Edie, L.C. et al (ed) *Vehicular Traffic Science. Proc. III Int. Symp. on the theory of traffic*

flow. Elsevier, New York, 1967.

- Herman, R., Lam, T., Prigogine, I. Kinetic theory of vehicular traffic: Comparison with data. *Transportation Science* 6 (1972) 4 : 440-452.
- HRB. Highway Capacity Manual. Special Report 87. Highway Research Board, Washington, 1965.
- Kockelke, W. Ermittlung von Kenngrößen des Verkehrsablaufs in Streckenabschnitten ohne Überholmöglichkeit mit Hilfe der Simulation. *Strassenverkehrstechnik*, 18 (1974) 2 : 46-52.
- McNeil, D.R. Growth and dissipation of a traffic jam. *Transportation Research* 3 (1969) 1 : 115-121.
- Miller, A.J. Queuing in rural traffic. In: Edie, L.C. et al (ed) *Vehicular Traffic Science. Proc. III Int. Symp. on the theory of traffic flow.* Elsevier, New York, 1967.
- Munjal, P. & Pahl, J. An analysis of the Boltzmann-type statistical models for multilane traffic flow. *Transportation Research* 3 (1969) 1 : 151-163, 1969.
- Munjal, P.K., Hsu, Y.S., Carpenter, R. Experimental validation of modified Boltzmann type of model and shift model for multilane traffic flow. *Highway Research Record* 409. Highway Research Board, Washington, 1972.
- Newell, G.F. A theory of platoon formation in tunnel traffic. *Operations Research* 7, (1959) 5 : 589-598.
- OECD. Area traffic control systems. OECD, Paris, 1972.
- OECD. Two-lane rural roads: design and traffic flow. OECD, Paris, 1972.
- Pavari-Fontana, S.L. On Boltzmann-like treatments for traffic flow: a critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic. *Transportation Research* 9 (1975) 4 : 225-235.
- Prigogine, I. & Herman, R. *Kinetic theory of vehicular traffic.* Elsevier, Amsterdam, 1971.
- Robertson, D.I. *Transyt: a traffic network study tool.* RRL Report LR253, Road Research Laboratory, Crowthorne, 1969.
- Rørbech, J. The multilane traffic flow process. An evaluation of queuing and lane-changing patterns, based on a markov model. Ministry of Public Works, Copenhagen, 1974.

- Seddon, P.A. Another look at platoon dispersion: 1. The kinematic wave theory. 2. The diffusion theory. 3. The recurrence relationship. Traffic Engineering and Control 13 (1971) 8 : 332-336, 13 (1972) 9:338-390 en 10:442-444.
- Shaw, L. On traffic jam queues. Transportation Research 4 (1970) 3 : 281-292.
- Tracz, M. The prediction of platoondispersion based on rectangular distribution of journey time. Traffic Engineering and Control 16 (1975) 11 : 490-492.
- Treiterer, J., Nemeth, Z., Vecellio, R. Effect of signal spacing on platoon dispersion. Ohio State University, Columbus, 1973.
- Warnshuis, P. Simulation of two-way traffic on an isolated two-lane road. Transportation Research 1 (1967) 1 : 75-83.
- Wiedemann, R. Pulkauflösung hinter Lichtsignalen; Anwendung eines Simulationsmodells. In: Leutzbach, W. & Baron, P. (ed) Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 86. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969.
- Yeo, G. Overtaking on rural roads. Linköping University, Linköping, 1975.

LITERATUUR CLUSTERMODELLEN TWEERICHTINGSVERKEER OP TWEE RIJ-
STROKEN

APPENDIX

bij

STATE OF THE ART RAPPORT "VERKEERSSTROOMMODELLEN"

Deel VI. Mesoscopische verkeersstroomkenmerken (R-78-40)

Ir. H. Botma

Voorburg, december 1977

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

LITERATUUR CLUSTERMODELLEN TWEERICHTINGSVERKEER OP TWEE
RIJSTROKEN ..

- Brill, E.A. Point processes arising in vehicular traffic flow. J.o. Applied Probability (1971) 8 : 809-814.
- Brilon, W. Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufe auf zweisprungen Landstrassen. Technische Universität, Karlsruhe, 1974.
- Daganzo, C.F. Probabilistic structure of two-lane road traffic. Transportation Research 2 (1975) 6 : 339-346.
- Erlander, S. A mathematical model for traffic on a two-lane road with some empirical results. Transportation Research 5 (1971) 2 : 155-175.
- Galin, D. & Epstein, B. Speeds and delays on two-lane roads where passing is possible at given points of the road. Transportation Research 8 (1974) 1 : 29-37.
- Gipps, P.G. Determination of equilibrium conditions for traffic on a two-lane road. In: Buckley (ed) Transportation and traffic theory. Proc. VI Int. Symp. on transportation and traffic theory. Elsevier, New York, 1974.
- Jacobs, F.J. Queues and overtakings on two-lane roads. In: Buckley (ed) Transportation and traffic theory. Proc. VI Int. Symp. on transportation and traffic theory. Elsevier, New York, 1974.
- Kössler, W. Mathematische Analyse der Verkehrsflusses mit Überholen. Technische Universität, München, 1972.
- Miller, A.J. Traffic flow treated as a stochastic process. In: Herman (ed) Theory of traffic flow. Proc. Symp. on the theory of traffic flow. Elsevier, Amsterdam, 1961.
- Miller, A.J. Queueing in rural traffic. In: Edie, L.C. et al (ed) Vehicular Traffic Science. Proc. III Int. Symp. on the theory of traffic flow. Elsevier, New York, 1967.
- Morse, P.M. & Yaffe, H.J. A queueing model for car passing. Transportation Science 5 (1971) 1:48-63.