

STATE OF THE ART RAPPORT "VERKEERSSTROOMMODELLEN"

Deel V. Mesoscopische verkeersstroomkenmerken

R-78-39

Ir. H. Botma

Voorburg, 1978

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

## INHOUD

### Samenvatting

### Symbolen

1.	<u>Inleiding</u>	1
2.	<u>Definities van de kenmerken</u>	3
2.1.	Volgtijden	3
2.2.	Volgafstanden	5
2.3.	Snelheden	5
2.4.	Combinaties van kenmerken	6
2.5.	Laterale kenmerken	8
2.6.	Momentane grootheden afgeleid uit locale en omgekeerd	8
2.7.	Mathematische verdelingen	9
2.7.1.	Inleiding	9
2.7.2.	Volgtijden en volgafstanden	10
2.7.3.	Snelheden	13
2.7.4.	Clusterlengten	14
3.	<u>Experimenteel onderzoek van het verkeer</u>	16
3.1.	Inleiding	16
3.2.	Volgtijden en volgafstanden	16
3.3.	Snelheden	19
3.4.	Combinaties	19
4.	<u>Relaties met kwaliteiten van het verkeer</u>	24
4.1.	Inleiding	24
4.2.	Relatie met veiligheid	24
4.2.1.	Volgtijden en volgafstanden	25
4.2.2.	Snelheden	25
4.2.3.	Combinaties	27
4.3.	Relatie met afwikkeling	29
5.	<u>Toepassingen</u>	31
5.1.	Inleiding	31
5.2.	Voorbeelden	31
5.3.	Snelheidslimieten	37

- 6. Slotbeschouwing
- 6.1. Conclusies
- 6.2. Evaluatie
- 6.3. Geïndiceerd onderzoek

77  
77  
90  
90

### Tabellen

### Afbeeldingen

### Literatuur

- Appendix A. Terminologie
- Appendix B. Definitie cluster en file
- Appendix C. Onderzoek van volgtijden en volgafstanden
- Appendix D. Onderzoek van snelheden
- Appendix E. Onderzoek van combinaties

## SAMENVATTING

In het vijfde deel van het State of the art rapport "Verkeersstroommodellen" worden zogenaamde mesoscopische verkeersstroomkenmerken behandeld. Dit zijn verzamelingen van lokaal of momentaan beschouwde voertuigbewegingskenmerken en de daaruit af te leiden kenmerken. De belangrijkste zijn de verdelingen van volgtijden, volgafstanden en snelheden. Een groot aantal mathematische verdelingen die hiervoor in aanmerking komen worden behandeld.

Vervolgens wordt het experimentele onderzoek van mesoscopische kenmerken behandeld. Het is voornamelijk gericht geweest op het vergelijken van geobserveerde en mathematische verdelingen, het vaststellen van de afhankelijkheid van opeenvolgende waarden en de relaties met mesoscopische verkeersstroomkenmerken, wegkenmerken en omstandigheden.

Nagegaan wordt wat er bekend is over relaties tussen mesoscopische verkeersstroomkenmerken en onveiligheid. Voor wat betreft volgtijden en volgafstanden is er wel enig onderzoek geweest maar dat heeft niet tot resultaten geleid. Bij snelheden zijn er wel relaties gevonden, waarbij is gebleken dat vooral de mate van variatie rond het gemiddelde van belang is voor de onveiligheid. Combinaties van mesoscopische kenmerken zijn nog slechts zelden aan onveiligheid gerelateerd en dit heeft nog niet tot resultaten geleid.

Tenslotte worden enige toepassingen van kennis op het gebied van mesoscopische verkeersstroomkenmerken gegeven. Ze hebben voornamelijk betrekking op maatregelen die direct het snelheidsgedrag trachten te beïnvloeden.

## SYMBOLLEN

B (.,.)	betafunctie
c	clusterlengte
C (.)	autocovariantiefunctie
E (.)	mathematische verwachting
L	locaal
M	momentaan
p (.)	kansdichtheid(sfunctie)
P (.)	verdeling(sfunctie)
Pr(.)	probabiliteit
q	intensiteit
s	volgafstand
S (.)	(energiedichtheids)spectrum
t	tijd
T	gemiddelde volgtijd
u	gemiddelde van locale snelheden
v	snelheid
Var	variantie
x	positie
$\Delta t$	tijdsinterval
$\Gamma(.)$	gammafunctie
$\rho(.)$	autocorrelatiefunctie
$\sigma$	standaardafwijking
$\tau$	volgtijd
$\omega$	(cirkel)frequentie

## 1. INLEIDING

In de drie vorige delen van dit rapport zijn de macroscopische verkeersstroomkenmerken intensiteit, dichtheid, gemiddelde snelheid en daar nauw mee samenhangende grootheden behandeld. In dit deel worden de "onderdelen" waaruit deze kenmerken zijn opgebouwd behandeld. Bij de gemiddelde snelheid is dat dus de verzameling snelheden waarover gemiddeld wordt, bij de intensiteit zijn het de volgtijden en bij de dichtheid de volgafstanden. Snelheden kunnen zowel lokaal als momentaan beschouwd worden, volgtijden zijn locale en volgafstanden momentane grootheden.

Dit niveau van beschouwing is mesoscopisch genoemd, enerzijds begrensd door de meer globale macroscopische beschrijving, anderzijds door de meer gedetailleerde microscopische beschrijving waarbij individuele voertuigtrajectoriën beschouwd worden.

De verzamelingen van de kenmerken zijn op zich moeilijk hanteerbaar en worden daarom gerepresenteerd door samenvattende grootheden. Het meest worden hiervoor verdelingen genomen waarbij men ieder kenmerk apart maar ook in combinatie met andere kan nemen. De representatie door verdelingen heeft geleid tot het suggereren van bepaalde mathematische verdelingsfuncties en tot onderzoek in hoeverre deze met de realiteit overeenstemmen. Naast de verdelingen zijn er ook andere samenvattende grootheden mogelijk, zoals de autocorrelatiefunctie. Onder mesoscopische verkeersstroomkenmerken zullen zowel de verzameling als de er uit af te leiden grootheden verstaan worden, echter met uitsluiting van de macroscopische verkeersstroomkenmerken.

Evenals in de andere delen van dit rapport komt aan de orde in hoeverre er een relatie is tussen de behandelde verkeersstroomkenmerken en de kwaliteit van het verkeer, in dit geval vrijwel geheel beperkt tot het aspect veiligheid. Aan de relatie tussen onveiligheid en snelheden is veel aandacht besteed, vooral in verband met snelheidslimieten. Naar aanleiding van het relatief grote aantal kop-staartbotsingen op drukke hoofdwegen zijn er pogingen

gedaan dit te verklaren uit de volgtijden, eventueel in combinatie met snelheden en snelheidsverschillen.

## 2. DEFINITIES VAN DE KENMERKEN

### 2.1. Volgtijden

De tijd die verloopt tussen het op een bepaalde plaats (doorsnede van een rijstrook) passeren van een voertuig en het opvolgende voertuig in dezelfde richting wordt volgtijd genoemd.

Men kan nog onderscheiden bruto en netto volgtijden; de eerste heeft betrekking op twee overeenkomstige punten van de voertuigen (voorkant, achterkant, eerste as), de tweede op de achterkant van het voorste voertuig en de voorkant van het volgende. Zonder nadere aanduiding zal in het volgende met volgtijd de bruto volgtijd bedoeld worden. Het is gebruikelijk voor de volgtijd van een voertuig die ten opzichte van de voorligger te nemen. Een enkele maal worden de volgtijden niet voor een rijstrook maar een rijbaan beschouwd, echter wel altijd voor voertuigen die in dezelfde richting rijden. Zie voor de terminologie van volgtijden Appendix A.

Een verzameling volgtijden  $\tau_i, i = 1, 2, \dots, n$  kan op diverse manieren gerepresenteerd worden.

A. Het meest gebruikt wordt het histogram of de empirische verdelingsfunctie die respectievelijk de kansdichtheid(sfunctie) en de verdeling(sfunctie) benaderen.

kansdichtheid  $p(\tau)d\tau = \Pr(\tau < \underline{\tau} \leq \tau + d\tau)$

verdeling  $P(\tau) = \Pr(\underline{\tau} \leq \tau)$

met  $\Pr$ =probabiliteit of waarschijnlijkheid en stochastische variabelen onderstreept. Achtergrond hierbij is de opvatting dat de volgtijden ten dele door een toevalsproces ontstaan, en dat daarbij de verdeling een belangrijk gegeven is. Bedacht moet worden dat bij deze representatie de volgorde in de tijd verloren gaat, anders gezegd, elke permutatie van de verzameling  $\tau_i$  levert dezelfde benadering van  $p(\tau)$  en  $P(\tau)$ .



Een triviale maar wel belangrijke relatie is dat de intensiteit gelijk is aan de reciproke van de gemiddelde volgtijd. Daarom is het gewenst de volgtijden te beschouwen bij een bepaalde intensiteit. Van de kansdichtheid of verdeling kunnen parameters als gemiddelde, variantie, scheefheid en percentielen beschouwd worden.

B. De autocovariantiefunctie is een representatie waarbij de tijdsvolgorde wel een rol speelt, en wordt gedefinieerd als:

$$C(j) = E((\tau_i - \bar{\tau})(\tau_{i+j} - \bar{\tau}))$$

Hierin is  $E$  de mathematische verwachting en  $\bar{\tau}$  de gemiddelde volgtijd.

$C(0)$  is de variantie van de volgtijden. De autocorrelatiefunctie  $\rho(j)$  is een genormeerde autocovariantiefunctie, dat wil zeggen  $\rho(j) = C(j)/C(0)$ . In deze beide functies komt de afhankelijkheid in het proces tot uiting. Zo zal als de volgtijden onafhankelijk zijn gelden  $\rho(j)=0$  voor  $j \neq 0$ ; verlopen de volgtijden volgens een 1e orde autoregressief proces dan zal  $\rho(j)$  geleidelijk naar nul gaan met toenemende  $j$ ; fluctueren de volgtijden regelmatig dan zal  $\rho(j)$  periodiek zijn. Zie voor meer toelichting op dit gebied bv. Bendat & Piersol (1966). Deze representatie wordt nog niet vaak gebruikt, in tegenstelling tot de verdeling. Wel is er een toenemende belangstelling voor de vraag of opeenvolgende volgtijden al of niet onafhankelijk zijn.

C. Naast of in plaats van de autocovariantiefunctie kan ook het (energiedichtheids)spectrum beschouwd worden. Dit beschrijft de verdeling van de variantie van het proces over de frequentie. De term energie die hier gehanteerd wordt moet dus niet letterlijk genomen worden. Strikt genomen bevatten de autocovariantiefunctie en het spectrum dezelfde informatie omdat ze elkaars Fouriergetransformeerde zijn.

Is de autocovariantiefunctie discreet, zoals in dit geval, dan kan

het spectrum als volgt gedefinieerd worden:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \left( 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} C(j) \cos j \omega \right) \quad -\pi < \omega < \pi$$

Hierin is  $\omega$  de (cirkel)frequentie.

## 2.2. Volgafstanden

De afstand die op een bepaald moment bestaat tussen twee overeenkomstige punten van twee zich achter elkaar bevindende voertuigen (vrijwel altijd wordt een rijstrook beschouwd) wordt de (bruto) volgafstand genoemd. De netto volgafstand is die tussen voor- en achterzijde van het volgende respectievelijk leidende voertuig. De volgafstand hoort, evenals de volgtijd, bij het volgende voertuig.

Volgafstanden en volgtijden vertonen zo'n grote analogie dat al wat in het voorgaande omtrent volgtijden is opgemerkt ook voor volgafstanden geldt. Dit laatste is tevens aanleiding tot de in dit rapport gekozen terminologie. Zie ook Appendix A voor de diverse termen die voor volgafstanden in gebruik zijn.

## 2.3. Snelheden

Een verzameling snelheden kan lokaal (index L) of momentaan (index M) verzameld zijn, en wordt veelal verwerkt tot een verdeling of beperkter tot gemiddelde en standaardafwijking.

Uit de in Deel II (par. 2.4.) behandelde relatie tussen intensiteit, dichtheid, locale en momentane kansdichtheid van de snelheden volgt een relatie tussen uitsluitend de locale en momentane snelheidskansdichtheid:

$$p_L(v) = v p_M(v) / \bar{v}_M$$

Hieruit kan worden afgeleid:

$$\bar{v}_L = \bar{v}_M + \sigma_M^2 / \bar{v}_M$$
$$\sigma_L^2 = \sigma_M^2 \left( 1 - \sigma_M^2 / \bar{v}_M^2 \right) + \mu_{3M} / \bar{v}_M \quad \text{met} \quad \mu_{3M} = \int (v - \bar{v}_M)^3 p_M(v) dv$$

Het locale gemiddelde is dus altijd groter dan het momentane, over de variantie is niet zonder meer een uitspraak te doen.

Voor representatie van de volgorde in tijd of plaats komen co-variantiefuncties en spectra in aanmerking, echter doordat hierbij alleen de volgorde van de snelheden beschouwd wordt en niet de bijbehorende volgtijd of volgafstand is interpretatie onduidelijk. Er is hier sprake van een combinatie van twee stochastische processen. Zo vormen bij een lokaal geobserveerde verkeersstroom zowel de tijdstippen waarop de gebeurtenissen (het passeren van de voertuigen) plaatsvinden als de beschouwde eigenschap van de gebeurtenis (de snelheid) een stochastisch proces. Dit proces is echter nogal complex zodat voorlopig een eenvoudiger aanpak, zoals in par. 2.4 geschetst, de voorkeur verdient.

Naast de snelheden zelf zijn ook de snelheidsverschillen van twee opeenvolgende voertuigen van belang, waarvoor dezelfde representaties gebruikt kunnen worden als voor de snelheden zelf.

#### 2.4. Combinaties van kenmerken

In plaats van het apart beschouwen van de diverse verzamelingen kan men dit ook voor bv. volgtijden en locale snelheden of volgafstanden en momentane snelheden gezamenlijk doen. Voor wat betreft de verdelingen zijn dan de gezamenlijke geschikt als representatie, bv.

$$P(v, \tau) = \Pr(\underline{v} \leq v \text{ en } \underline{\tau} \leq \tau)$$

en de conditionele, bv.

$$P(v|\tau) = \Pr(\underline{v} \leq v \text{ onder de conditie } \underline{\tau} = \tau)$$

en de daaruit af te leiden grootheden als correlaties en regressies. Het aantal te beschouwen kenmerken is natuurlijk nog uit te breiden, bv. met voertuigtype.

Een speciale manier van ordening van de kenmerken is het verde-  
len van de verkeersstroom in "vrije" en "gebonden" voertuigen.  
De term vrije betekent het niet of slechts in geringe mate be-  
invloed worden door andere voertuigen. Dit idee is uitgewerkt  
voor voertuigen die van dezelfde rijstrook gebruik maken, waarbij  
voor een verzameling opeenvolgende gebonden voertuigen hier de  
term cluster zal worden gebruikt. Men kan ook stellen dat clusters  
een gevolg zijn van beperkte inhaalmogelijkheden.

Hoewel het begrip cluster intuïtief vrij duidelijk lijkt, is  
operationalisering niet triviaal. Het beste lijkt dit mogelijk  
als men de beschikking heeft over voertuigtrajectoriën. Daar  
dit echter zelden het geval is heeft men vrijwel uitsluitend ge-  
tracht clusters te definiëren met behulp van locale kenmerken.  
Meestal wordt dan de volgtijd als criterium genomen, d.w.z. een  
voertuig behoort tot een cluster als zijn volgtijd kleiner is dan  
een bepaalde grenswaarde.

Tevens wordt de leider, met een grotere volgtijd, tot het cluster  
gerekend. Soms wordt de definitie uitgebreid met een tweede con-  
ditie, en wel dat het snelheidsverschil binnen bepaalde grenzen  
moet liggen.

De moeilijkheid bestaat nu uit het kiezen van de grenswaarden.  
In de oudste Highway Capacity Manual (HRB, 1950) wordt gesteld  
dat er beïnvloeding is bij een volgtijd kleiner dan 9 seconden.  
In het algemeen worden bij de definitie van clusters echter klei-  
nere waarden genomen. In het kader van onderzoek naar het effect  
van snelheidslimieten beveelt de OECD (1972) als grenswaarde voor  
de volgtijd 5 seconden aan en nog de extra voorwaarde dat tevens  
het snelheidsverschil kleiner dan 10 km/h moet zijn. Lenz & Stein-  
hoff (1976) stellen dat op autosnelwegen 5 seconden ook nog te  
ruim is. Ze lieten een aantal personen op het oog de voertuigen klas-  
seren tot al of niet tot een cluster behorend. Het bleek dat de  
klasseringen correspondeerden met grenswaarden voor de volgtijden  
die kleiner dan 3 seconden waren. Tenslotte verdient de meer objec-  
tieve methode van Underwood (1963) vermelding. Daarbij wordt de  
absolute waarde van het snelheidsverschil beschouwd als functie  
van de volgtijd. Het bleek dat, vanaf een zekere volgtijd, het

absolute snelheidsverschil vrijwel niet meer afhankelijk was van de volgtijd en deze waarde, die ca. 5 seconden bedroeg, werd als grenswaarde genomen (zie ook par. 3.4 en Appendix E).

Behalve de term cluster is binnen Nederland het woord file in gebruik om gebonden verkeer aan te duiden, waarbij dan meestal tevens wordt gedacht aan grote aantallen voertuigen die eventueel ook stilstaan. Zie voor de terminologie op dit gebied Appendix A. Het lijkt gewenst de begrippen cluster en file zodanig te definiëren dat ze niet samenvallen. Een suggestie hiervoor wordt gegeven in Appendix B.

De mate van clustering kan gerepresenteerd worden door de gemiddelde clusterlengte (in aantal voertuigen), het histogram van clusterlengten enz. Verder kunnen de clusters nog gekarakteriseerd worden door hun snelheid, volgtijd ten opzichte van andere clusters, interne volgtijden en snelheidsverschillen enz.

#### 2.5. Laterale kenmerken

De voorgaande kenmerken hadden betrekking op longitudinale bewegingsaspecten. Hier kunnen de laterale nog aan toegevoegd worden, zoals de laterale positie (zowel lokaal als momentaan). Hiermee wordt dan niet de rijstrook, als meest grove classificatie, bedoeld, maar de positie binnen de rijstrook. Laterale snelheden worden zelden beschouwd en laterale versnellingen in het algemeen alleen in bogen. Daar komt bij dat van willekeurige, d.w.z. niet geïnstrumenteerde, voertuigen de laterale snelheid en versnelling moeilijk te observeren zijn.

Bij verkeersstromen blijven laterale kenmerken meestal buiten beschouwing. Het in par. 4.2.3 te behandelen onderzoek van Pagano (1972) is hierop een uitzondering.

#### 2.6. Momentane grootheden afgeleid uit locale en omgekeerd

Volgafstanden zijn van nature momentaan. Vaak beschikt men echter

alleen over locale gegevens in de vorm van snelheden en volgtijden. Hieruit kunnen volgafstanden worden geschat, het is echter niet evident wat in dit geval de beste schattingsformule is. Duid de volgtijd en snelheid van voertuig  $i$  aan met respectievelijk  $\tau_i$  en  $v_i$ . De volgafstand van voertuig  $i$  is dan te schatten met:

$$S_{i,1} = v_{i-1} \tau_i \text{ of } S_{i,2} = v_i \tau_i \text{ (zie Afbeelding 1).}$$

Het verschil tussen beide schattingen is evenredig met het snelheidsverschil. Op die grond komt een combinatie van beide schattingen in aanmerking, bv.  $S_{i,3} = \frac{1}{2} (v_{i-1} + v_i) \tau_i$ .

Op volkomen analoge wijze kunnen uit momentane snelheden en volgafstanden de volgtijden worden geschat.

Wat betreft de snelheden is in par. 2.3 reeds de relatie tussen locale en momentane gegevens behandeld.

## 2.7. Mathematische verdelingen

### 2.7.1. Inleiding

In het voorgaande is gesteld dat van volgtijden, volgafstanden, snelheden en clusterlengten vaak de verdelingen beschouwd worden. Dit kan vanuit verschillende gezichtspunten gebeuren. Zo kan een theoretische beschouwing tot een zeker type verdeling leiden en dan levert vergelijking met de experimentele verdeling een toetsingsmogelijkheid voor de theorie. Anderzijds kan men bij een theorie een mathematische verdeling nodig hebben als basisgegevens. Tenslotte kan een beschrijving van een experimentele door een mathematische verdeling leiden tot een datareductie, omdat de verzameling kenmerken dan te representeren is door het type verdeling en de parameterwaarden.

In het volgende worden een aantal mathematische verdelingen voor de diverse kenmerken gepresenteerd, gekozen op grond van wat in de

literatuur is aangetroffen. De achtergrond van een verdeling is veelal ten dele theoretisch van aard en berust anderzijds op vergelijking met empirische gegevens. Het onderzoek naar een passende verdeling komt in hoofdstuk 3 aan de orde.

### 2.7.2. Volgtijden en volgafstanden

Voor volgtijden en, vanwege de eerder genoemde sterke analogie, dus ook voor volgafstanden zijn een vrij groot aantal mathematische verdelingen voorgesteld.

#### Exponentieel (1 parameter; zie Afbeelding 2a)

De kansdichtheid is in dit geval:

$$p(\tau) = \frac{1}{T} \exp(-\tau/T) \quad \text{met } \tau \geq 0$$

De mathematische verwachting en de variantie zijn respectievelijk:

$$E(\tau) = T \quad \text{Var } \tau = T^2$$

Deze kansdichtheid en de bijbehorende verdeling worden ook vaak aangeduid met de naam negatief exponentieel. De toevoeging negatief wordt hier weggelaten omdat ze in feite overbodig is.

Deze kansdichtheid kan afgeleid worden uit de veronderstelling dat het passeren van voertuigen op een doorsnede volgens een Poisson-proces plaats vindt. Dat wil zeggen dat in elk klein tijdsinterval de kans dat er een voertuig passeert gelijk is en dat het al of niet optreden van deze gebeurtenis onafhankelijk is van wat er in andere tijdsintervallen gebeurt. Een bezwaar tegen de exponentiële verdeling is dat zeer korte (bruto) volgtijden kunnen voorkomen, die alleen al door de eindige voertuiglengten niet realistisch zijn, terwijl tevens de verdeling bij hoge intensiteiten niet goed blijkt te passen. Het eerste bezwaar is te overkomen door in plaats van de bruto de netto volgtijden te beschouwen, die echter moeilijker observeerbaar zijn. Beide bezwaren kunnen mogelijk verholpen worden door andere verdelingen te kiezen, in het algemeen met meer dan één parameter.

Verschoven exponentieel (2 parameters; zie Afbeelding 2b)

$$p(\tau) = \frac{1}{T} \exp(-(\tau - \tau_0)/T) \quad \text{voor } \tau \geq \tau_0 > 0$$

$$E(\underline{\tau}) = \tau_0 + T \quad \text{Var } \underline{\tau} = T^2$$

Hiermee is dus de kans op kleine volgtijden verdwenen.

Gamma (2 parameters; zie Afbeelding 2c)

$$p(\tau) = (k/T)^k \tau^{k-1} \exp(-k\tau/T) / \Gamma(k) \quad \text{met } \tau \geq 0$$

met de gammafunctie

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{k-1} dt$$

$$E(\underline{\tau}) = T \quad \text{Var } \underline{\tau} = T^2/k$$

Bij deze dichtheid wordt de kans op kleine volgtijden niet nul maar wel gering.

Een andere naam voor deze dichtheid is Pearson type III, voor k geheel wordt de naam Erlang gebruikt en voor k=1 ontstaat de exponentiële dichtheid.

Lognormaal (2 parameters; zie Afbeelding 2d)

$$p(\underline{\tau}) = \frac{1}{\underline{\tau} \sqrt{2\pi}} \exp(-(\ln \underline{\tau} - \mu)^2 / (2\sigma^2)) \quad \text{met } \underline{\tau} > 0$$

$$E(\underline{\tau}) = \exp(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2) \quad \text{Var } \underline{\tau} = \exp(2\mu + \sigma^2)(\exp\sigma^2 - 1)$$

Deze dichtheid heeft de eigenschap dat de logaritme van de variabele normaal verdeeld is. Dit maakt een eventuele ruwe toetsing of de verdeling passend is betrekkelijk eenvoudig. Het karakter van de lognormale verdeling stemt globaal overeen met de gammaverdeling.

Opmerking: Zowel de gamma als de lognormale verdeling kunnen ook nog verschoven worden gebruikt.



### Combinaties

Bij de tot nu toe genoemde verdelingen werd verondersteld dat ze voor alle voertuigen in de stroom golden. Bij opdeling van de stroom in "vrije" en "gebonden" voertuigen (zie ook onder "combinaties van kenmerken"), wordt wel verondersteld dat voor elke deelverzameling een verschillende volgtijdverdeling geldt. Zo ontstaan vele mogelijkheden tot combinatie waarvan er hier enkele genoemd zullen worden.

#### 2x verschoven exponentieel (5 parameters)

$$p(\tau) = U(\tau - \tau_1) \frac{\alpha}{T_1} \exp(-(\tau - \tau_1)/T_1) + U(\tau - \tau_2) \frac{1-\alpha}{T_2} \exp(-(\tau - \tau_2)/T_2)$$

met stapfunctie  $U(\tau)$  is 0 voor  $\tau < 0$  en is 1 voor  $\tau \geq 0$ .

Het deel  $\alpha$  van de voertuigen rijdt "vrij", met gemiddelde resp. minimale volgtijd  $T_1$  en  $\tau_1$ , en de overige "gebonden" met analoog  $T_2$  en  $\tau_2$ . Een bezwaar lijkt wel dat ook gebonden voertuigen grote volgtijden kunnen hebben.

#### Verschoven exponentieel + normaal (5 parameters)

$$p(\tau) = U(\tau - \tau_1) \frac{\alpha}{T_1} \exp(-(\tau - \tau_1)/T_1) + \frac{1-\alpha}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-(\tau - \tau_2)^2/(2\sigma^2))$$

waarbij de fractie  $\alpha$  van de voertuigen vrij rijdt.

#### Model Petigny (6 parameters)

Nog verder in de opdeling gaat Petigny (1967) die de gebonden voertuigen verdeelt in blijvende volgers en tijdelijke, de laatste in afwachting van inhaalmogelijkheden. Voor de vrije voertuigen geldt een verschoven exponentiële verdeling, de beide soorten volgers rijden elk met een vaste volgtijd. Het lijkt overigens realistischer ook voor de volgtijden van de volgers een verdeling te veronderstellen.

Bij de combinaties van verdelingen is het een probleem de scheiding

tussen vrij rijdende en gebonden voertuigen te operationaliseren. Meestal wordt een bepaalde volgtijd als grens gekozen waar beneden een voertuig als gebonden wordt beschouwd (zie ook het in par. 2.4 gestelde). Deze scheidingsmethode is echter niet bij alle combinaties van verdelingen bruikbaar.

### 2.7.3. Snelheden

Ook voor snelheden zijn een aantal mathematische verdelingen voorgesteld, waarvan de als eerste te noemen "normale" veruit het meest getoetst en gebruikt wordt.

Normale (2 parameters; zie Afbeelding 3a)

$$p(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(v-\bar{v})^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$E(\underline{v}) = \bar{v} \quad \text{Var } \underline{v} = \sigma^2$$

In theorie is het een bezwaar dat de kans op negatieve snelheden hoewel klein niet geheel gelijk aan nul is; voor bv.  $\bar{v}$  groter dan  $3\sigma$  is de kans kleiner dan 0,1%. Dit is o.a. een bezwaar als men uit de snelheidsverdeling een theoretisch aantal inhaalmanoeuvres wil afleiden.

Gamma en lognormaal (2 parameters)

Zie voor de formules het voorgaande. Bij deze verdelingen zijn negatieve snelheden uitgesloten en is de kansdichtheid niet symmetrisch.

Beta (3 parameters; zie Afbeelding 3b)

$$p(v) = v^{a-1} (\hat{v}-v)^{b-1} / (B(a,b) \hat{v}^{a+b-1}) \quad 0 \leq v \leq \hat{v}$$

$$\text{met betafunctie } B(a,b) = \Gamma(a)\Gamma(b) / \Gamma(a+b)$$

$$E(\underline{v}) = a\hat{v}/(a+b) \quad \text{Var } \underline{v} = ab\hat{v}^2 / ((a+b)^2(a+b+1))$$

In dit geval zijn zowel negatieve als snelheden groter dan de waarde  $\hat{v}$  uitgesloten.

Model Lindner (4 parameters)

$$p(v) = p_n(v) - \gamma_1 p_n^{(3)}(v) + \gamma_2 p_n^{(4)}(v)$$

met  $p_n^{(i)}(v)$  is  $i^e$  afgeleide van normale kansdichtheid,  $\gamma_1$  = scheefheid en  $\gamma_2$  = excess van  $p(v)$ . Deze kansdichtheid wordt door Lindner (1967) aanbevolen als de normale duidelijk niet past.

Evenals bij de verdeling van volgtijden en volgafstanden kan men combinaties van diverse verdelingen toepassen. In plaats van een opdeling van de stroom in vrije en gebonden voertuigen ligt een onderscheid naar voertuigkenmerken, bv. personen- en vrachtauto's, meer voor de hand.

2.7.4. Clusterlengten

Een aantal mathematische kansdichtheden voor de clusterlengten ( $\underline{c}$ ) zijn gesuggereerd, waarvan hier enkele genoemd zullen worden.

Geometrisch (1 parameter; zie Afbeelding 4a)

$$\Pr(\underline{c}=k) = (1-\alpha)\alpha^{k-1} \quad k=1,2,3,\dots \quad E(\underline{c}) = 1/(1-\alpha)$$

Deze dichtheid is vanuit minstens twee uitgangspunten af te leiden:

- Stel dat een voertuig tot een cluster behoort als de volgtijd kleiner is dan  $\tau_g$ , dat dit met kans  $\alpha$  gebeurt en dat de volgtijden onafhankelijk van elkaar zijn (voor de leiders van clusters geldt  $\tau \gg \tau_g$ ).

- Stel dat het passeren van voertuigen wordt beschreven door het volgende Markov proces: in het tijdsinterval  $\Delta t$  passeert er één voertuig (twee is per definitie uitgesloten) of een gat (d.w.z. geen voertuig); de kans dat een voertuig een voertuig volgt is  $\alpha$ , dat er na een gat weer een gat komt  $\beta$ ; een cluster is een opeenvolging van voertuigen zonder gat er tussen. In dit geval zijn dus

de opeenvolgende volgtijden niet meer onafhankelijk. Zie voor meer details Latour (1973).

Borel-Tanner (1 parameter; zie Afbeelding 4b)

$$\Pr(\underline{c}=k) = (k\alpha e^{-\alpha})^{k-1} e^{-\alpha}/k! \quad E(\underline{c}) = 1/(1-\alpha)$$

Miller met 1 parameter

$$\Pr(\underline{c}=k) = (m+1) B(m+2, k) \quad \text{met } B=\text{betafunctie}$$

Miller met 2 parameters

$$\Pr(\underline{c}=k) = B(m+2, r+k)/B(m+1, r+1)$$

De laatste drie kansdichtheden zijn ontleend aan Taylor et al (1974).

### 3. EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

#### 3.1. Inleiding

In dit gedeelte wordt behandeld wat er uit experimenteel onderzoek bekend is omtrent de mesoscopische verkeersstroomkenmerken. Het zal voornamelijk gaan over de verdelingen, de afhankelijkheid van opeenvolgende waarden en de relaties met macroscopische verkeersstroomkenmerken, wegkenmerken en omstandigheden. De relaties met de kwaliteiten van het verkeer komen in hoofdstuk 4 aan de orde, al zal er bij de motivering van het experimentele onderzoek wel op vooruit gelopen worden. Binnen de beschikbare verzameling bronnen is gekozen op grond van recentheid (meestal niet ouder dan 1965) en kwaliteit van de rapportage, met een voorkeur voor Nederlands onderzoek.

#### 3.2. Volgtijden en volgafstanden

Vooraf naar volgtijden is vrij veel onderzoek gedaan, naar volgafstanden minder omdat die moeilijker te observeren zijn.

De interesse is hierbij gericht op:

- globale vorm van de verdeling;
- mathematische verdelingsfunctie;
- afhankelijkheid van de intensiteit;
- al of niet afhankelijk zijn van opeenvolgende volgtijden;
- invloed van wegtype, eventueel ook van kenmerken binnen het type;
- invloed van maatregelen (bv. snelheidslimieten);
- invloed van voertuigkenmerken.

Motivering voor het onderzoek is onder meer:

- Verzamelen algemene kennis van verkeersstromen.
- Leggen van relatie met veiligheid.

Het vermoeden bestaat dat het vóórkomen van korte volgtijden samen gaat met een verhoogde kans op kop-staartbotsingen, echter ook lange volgtijden kunnen bij hoge intensiteit van belang zijn voor het opvangen van verstoringen (uitvoeriger komt dit aan de orde in Deel VIII van het rapport bij car-following modellen) terwijl ook de onderlinge

afhankelijkheid van volgtijden dan mogelijk een rol speelt. Als er een relatie bestaat tussen intensiteit en ongevallequotiënt (zie hiervoor Deel II) dan biedt bij hoge intensiteiten de bijbehorende volgtijdverdeling mogelijk een "verklaring" hiervoor. Het is ook mogelijk dat de intensiteit de volgtijden niet geheel bepaalt en dat de variatie die nog overblijft van belang is voor de veiligheid. Voorstelbaar is verder dat niet de volgtijden alleen maar de combinatie met de bijbehorende snelheden invloed heeft op de veiligheid (zie voor het laatste ook par. 3.4 en par. 4.2.1).

- Capaciteitbepaling.

Sommige parameters van de volgtijdverdeling blijken naar grenswaarden te convergeren bij toenemende intensiteit. Dit biedt mogelijkheden de capaciteit door extrapolatie te schatten.

- Wachttijdbepalingen.

Bij het kruisen van een verkeersstroom door een ondergeschikte (voertuigen, voetgangers) die voorrang moet verlenen zijn voor het bepalen van de wachttijden o.a. de volgtijden in de hoofdstroom nodig.

- Ontwerp van toeritregeling.

Dit geldt voor "microscopische" toeritregelingen, waarbij een voertuig in een voldoende grote volgtijd van de hoofdstroom wordt geleid.

- Gebruik bij simulatie (zie onder toepassingen in hoofdstuk 5).

Een aantal onderzoeken zijn bekeken en naar bepaalde aspecten geordend in Tabel 1. Het blijkt dat:

- het bepalen van een passende mathematische verdeling veel aandacht krijgt;
- het meeste onderzoek uitgevoerd is op autosnelwegen, een minderheid op enkelbaans wegen buiten de bebouwde kom;
- het effect van de intensiteit meestal beschouwd is;
- onderzoek van andere factoren vrij zeldzaam is (snelheidslimieten);
- de eventuele onderlinge afhankelijkheid nog maar summier onderzocht is.

Een korte beschrijving van de beschouwde onderzoeken wordt gegeven

in Appendix C. De belangrijkste resultaten zijn:

- Globale vorm.

De kansdichtheid heeft vrijwel steeds één modus (maximum), die kleiner is dan de mediaan (50 percentiel), en de mediaan is weer kleiner dan het gemiddelde, met andere woorden een staart aan de kant van de grote volgtijden.

- Effect intensiteit.

Een toenemende intensiteit gaat samen met een daling van de percentielen, de hoge het meest en de lage minder. Modus, mediaan en lagere percentielen naderen tot grenswaarden voordat de intensiteit de capaciteit bereikt (HRB, 1965; LVV, 1969; Caminada, 1973).

- Mathematische verdeling.

Tot aan een zekere intensiteit is de eenvoudige exponentiële verdeling een passende beschrijving. Dit betekent niet dat het verloop bij korte volgtijden reëel is, echter dit detail gaat verloren bij de beoordeling omdat men bij lage intensiteiten noodzakelijk met grote volgtijdklassen werkt. Vanaf een zekere intensiteit blijkt de lognormale verdeling, die flexibel en relatief eenvoudig hanteerbaar is, wel te voldoen (Greenberg, 1966; May, 1965; Storost, 1974; Tolle & Treiterer, 1969). Tot aan welke intensiteit de exponentiële verdeling voldoet is nog niet aan te geven, wel ligt ze lager naarmate op de betreffende weg inhalen moeilijker is. Men kan vermoeden dat de lognormale verdeling ook bij lagere intensiteit wel vrij goed past, maar dit is nog niet onderzocht.

De combinaties van verschillende verdelingen zijn aantrekkelijk vanuit het oogpunt van interpretatie, echter ze blijken praktisch moeilijk hanteerbaar door de vele parameters en de benodigde opsplitsing van de verkeersstroom in delen.

- Verskil tussen rijstroken autosnelweg.

Bij gelijke intensiteit is de kansdichtheid breder bij een meer naar links gelegen rijstrook (LVV, 1965; Caminada, 1973; Storost, 1974).

- Effect maximum snelheid op autosnelweg.

Een starre limiet heeft geen effect (LVV, 1969), een belastingafhankelijke limiet veroorzaakt een daling van de fractie volgtijden kleiner dan 1 seconde (Zackor, 1972).

- Afhankelijkheid van opeenvolgende volgtijden.

Op autosnelwegen geen afhankelijkheid, ongeacht de intensiteit (Breiman et al, 1969 en Munjal & Hsu, 1973); op een enkelbaans tweestrooksweg wel volgens Miller en niet volgens Cowan (1975).

- Volgafstanden.

In de twee gevallen dat ze beschouwd zijn gedragen ze zich als de volgtijden, nl. lognormale verdeling past goed (Greenberg, 1966) en opeenvolgende volgafstanden zijn op een autosnelweg niet afhankelijk (Munjal, 1973).

- Voertuigkenmerken.

Voertuigen met een relatief hoge topsnelheid (mechanisch maximaal te rijden snelheid) blijken op autosnelwegen relatief vaker met een korte volgtijd te rijden (Brühning, 1973).

### 3.3. Snelheden

Vrijwel uitsluitend locale snelheden (spotspeeds) zijn gemeten en geanalyseerd, momentane haast niet als gevolg van de moeilijke observeerbaarheid; een uitzondering is het onderzoek van Munjal & Hsu (1973).

De interesse is gericht op:

- globale vorm van de verdeling, vooral gemiddelde en standaardafwijking;
- mathematische verdelingsfunctie;
- verloop in de tijd (lange termijn);
- invloed van wegtype en kenmerken binnen het type;
- invloed van bestuurders- en voertuigkenmerken;
- invloed van omstandigheden als dag/nacht, nat/droog;
- afhankelijkheid van opeenvolgende snelheden.

Motivering voor het onderzoek is onder meer:

- Verzamelen algemene kennis van verkeersstromen.
- Leggen van relaties met veiligheid.

Het vermoeden bestaat dat absoluut hoge snelheden, grote snelheidsverschillen, niet of onvoldoende aan de betreffende omstandigheden aangepaste snelheden, enz. de kans op, en de ernst van ongevallen nadelig beïnvloeden (zie ook par. 4.2.2).

- Ontwerp van wegen.

Kennis van de samenhang tussen wegkenmerken en snelheden is nodig



teneinde door middel van het wegontwerp de snelheden op het gewenste niveau te brengen.

- Reistijden.

Uit snelheden kunnen zowel collectieve als individuele reistijden afgeleid worden.

- Gebruik bij simulatie (zie hoofdstuk 5).

Een aantal onderzoeken zijn bekeken en naar bepaalde aspecten geordend in Tabel 2. Het blijkt dat:

- het onderzoek van de verdeling niet zo centraal staat als bij volgtijden;
- het meeste onderzoek is verricht op autosnelwegen;
- de intensiteit als invloedsfactor vrijwel steeds beschouwd wordt;
- er al vrij veel andere invloedsfactoren onderzocht zijn;
- de onderlinge afhankelijkheid nog niet veel aandacht heeft gekregen.

Korte beschrijvingen van de beschouwde onderzoeken worden gegeven in Appendix D. De belangrijkste resultaten zijn:

- Mathematische verdeling.

De veronderstelling dat de snelheden normaal verdeeld zijn wordt bij toetsing vaak niet verworpen. Het gaat echter te ver hieruit te concluderen dat snelheden altijd zo verdeeld zijn; zo constateren Schlums & Burkhardt (1966) dat bij lage intensiteit op de rechterstrook van een autosnelweg de kansdichtheid van de snelheid van personenauto's tweetoppig is.

- Intensiteit of afwikkelingsniveau.

Met toenemende intensiteit en dalend afwikkelingsniveau dalen gemiddelde en standaardafwijking van de snelheden; HRB (1965), Schlums & Burkhardt (1969) en Wolff (1966). Hoe de variatiecoëfficiënt, d.w.z. standaardafwijking gedeeld door gemiddelde, zich gedraagt wordt meestal buiten beschouwing gelaten.

- Wegkenmerken.

a) Autosnelwegen. Op modernere typen (ruimer profiel, vlakker wegdek) zijn gemiddelde en spreiding hoger en minder intensiteitsafhankelijk; Wolff (1966). Op de rechter rijstrook is de gemiddelde snelheid lager en de spreiding groter; HRB (1965) en Schlums &

Burkhardt (1969).

b) Enkelbaanswegen. Vooral het horizontaal en verticaal profiel zijn van belang; Oppenlander (1966) en O'Flaherty (1971).

- Dag/nacht.

a) Autosnelwegen. Tegenstrijdige resultaten van Schlums & Burkhardt (1966) en Lamm (1971) omtrent de verandering van de gemiddelde snelheid.

b) Enkelbaanswegen. Bij nacht lagere snelheden; dit geldt niet of zelfs omgekeerd bij horizontale bogen met kleine straal; Lamm (1971).

- Nat/droog.

Bij nat wegdek is de hele snelheidsverdeling verschoven naar lagere snelheden, waarbij de hoge snelheden het meest veranderen; Lamm (1971).

- Maximum snelheid.

Over het effect op het gemiddelde bestaat geen overeenstemming, in het algemeen daalt de variantie; Schlums & Burkhardt (1969) en SWOV (1971).

- Trend in de tijd.

De lange termijn trend van snelheden is stijgend; HRB (1965) en OECD (1972). Voor Britse autosnelwegen is dit voor de periode 1971-1973 door Eaton & Burrow (1974) bevestigd.

- Afhankelijkheid.

Op autosnelwegen zijn opeenvolgende snelheden, zowel de locale als de momentane, sterk afhankelijk; Pahl & Sands (1971) en Munjal & Hsu (1973). Hierbij spelen ook de bijbehorende volgtijden een rol; zie par. 3.4.

- Voertuigkenmerken.

Van belang is het type; binnen de categorie vrachtauto's het gewicht en binnen de categorie personenauto's de topsnelheid; Oppenlander (1966) en Brühning (1973).

### 3.4. Combinaties

Bij combinaties zijn er vele mogelijkheden voor wat betreft de keuze van de onderdelen en de analyse. De interesse is tot nu gericht op:

- relatie tussen afhankelijkheid van opeenvolgende snelheden en

volgtijden;

- relatie tussen reële volgafstanden en benodigde bij plotseling afremmen;
- afhankelijkheid van intensiteit;
- gemiddelde clusterlengte en verdeling;
- invloed van snelheidslimieten.

Motivering voor het onderzoek is ondermeer:

- Verzamelen algemene kennis van verkeersstromen.
- Leggen van relatie met veiligheid.

Bij hoge intensiteit vormen kop-staartbotsingen een aanzienlijk deel van de ongevallen. Beschrijving van dit type ongeval is mogelijk vanuit diverse theoretische invalshoeken: perceptie en informatieverwerking door de bestuurders (valt buiten het onderwerp verkeersstromen), stabiliteit van de bestuurder als regelaar (komt aan de orde bij car-following in Deel VIII) en benodigde en beschikbare volgafstand of remvertraging. In het laatste geval heeft men o.a. snelheden en volgtijden nodig.

Het vermoeden bestaat dat als er veel clusters in een verkeersstroom voorkomen de bestuurders een lagere veiligheidsmarge bij hun manoeuvres in acht nemen, vooral bij inhalen op tweestrookswegen. De clusterlengte lijkt van belang voor de voortplanting van verstoringen en dus ook voor de veiligheid.

- Gebruik bij simulatie (zie hoofdstuk 5).

Een aantal onderzoeken zijn bekeken en naar bepaalde aspecten geordend in Tabel 3. Het blijkt dat:

- het meeste onderzoek uitgevoerd is op autosnelwegen;
- het effect van de intensiteit meestal beschouwd is;
- bij clusters voornamelijk de gemiddelde lengte geanalyseerd is.

Een korte beschrijving van de beschouwde onderzoeken wordt gegeven in Appendix D. De belangrijkste resultaten zijn:

- Afhankelijkheid.

Snelheden en volgtijden bleken op een autosnelweg niet afhankelijk (Pahl & Sands, 1971). De bij snelheden in par. 3.3 reeds genoemde

afhankelijkheid van opeenvolgende locale snelheden blijkt samen te hangen met de bijbehorende volgtijden, de afhankelijkheid bestaat alleen voor volgtijden kleiner dan een zekere grenswaarde (Pahl & Sands, 1971; Caminada, 1973; Underwood, 1963).

- Beoordeling volgen.

Op grond van volgtijd, snelheid, snelheidsverschil, voertuigcategorie (vrachtauto's hebben minder remvermogen dan personenauto's) worden voertuigen geclasseerd als wel of niet (potentieel) gevaarlijke volgers. Op autosnelwegen is het aantal gevaarlijke volgers gerelateerd aan een aantal variabelen. Het absolute aantal is op de rechterstrook onafhankelijk van de intensiteit. Het relatieve aantal op de linkerstrook stijgt zonder maximum snelheid, vanaf een rijbaanintensiteit van ca. 1300 vtg/h, en is met maximum snelheid constant. Er is geen invloed gevonden van de fractie vrachtverkeer, wel een reductie bij duisternis van 20 à 25% (Burkhardt, 1966 en Schlums & Burkhardt, 1969).

- Gemiddelde clusterlengte.

Deze neemt toe met de intensiteit. Er zijn aanwijzingen dat de toeneming op enkelbaans tweestrookswegen en bij eenstrooksverkeer bij zekere intensiteit zeer sterk is (Montroll, 1961 en Underwood, 1963). Bij tweestrooksrijbanen voor een richting zijn, gegeven de intensiteit, de clusters op de rechterstrook korter (Underwood, 1963). Op autosnelwegen neemt de gemiddelde lengte exponentieel toe met de rijbaanintensiteit, is geen effect van het percentage vrachtverkeer aangetoond, en veroorzaakt een maximumsnelheid een daling (Schlums & Burkhardt, 1966).

- Verdeling clusterlengte.

Op enkelbaans tweestrookswegen is de Miller verdeling met twee parameters een redelijke beschrijving (Taylor, 1974).

- Interne clusterkenmerken.

Alleen de volgtijden zijn beschouwd. Op enkelbaans tweestrookswegen is de volgtijd minimaal bij het 10e à 15e voertuig van het cluster (Underwood, 1963). Op autosnelwegen zijn de volgtijden binnen het cluster niet afhankelijk van de clusterlengte en niet van de positie binnen het cluster (Athol, 1965).

#### 4. RELATIE MET KWALITEITEN VAN HET VERKEER

##### 4.1. Inleiding

In Deel II van het rapport is behandeld wat er bekend is van de relaties tussen macroscopische verkeersstroomkenmerken en kwaliteiten van het verkeer, gegeven de wegkenmerken, constante of een normale variatie vertonende omstandigheden, bestuurders- en vaste voertuigkenmerken. Hetzelfde zal nu gedaan worden voor de gepresenteerde mesoscopische verkeersstroomkenmerken, waarbij dan tevens de macroscopische kenmerken als gegeven beschouwd worden. Ter illustratie: wat is, gegeven de weg, omstandigheden, intensiteit en gemiddelde snelheid, de relatie van de snelheidsverdeling met de kwaliteiten van het verkeer. Evenals in het voorgaande zullen van de kwaliteiten alleen veiligheid en afwikkeling aan de orde komen.

##### 4.2. Relatie met veiligheid

###### 4.2.1. Volgtijden en volgafstanden

De gemiddelde volgtijd en volgafstand worden geheel bepaald door respectievelijk de intensiteit en de dichtheid, echter de verdeling en in het bijzonder het optreden van korte volgtijden en afstanden kan nog verschillend zijn.

Door Beckmann (1969) is getracht een relatie tussen ongevallenquotiënt en volgtijdverdeling te leggen. Hierbij werden binnen een weglengte van 500 km autosnelweg een groep extra veilige en extra onveilige wegvakken met elkaar vergeleken. Het verschil kon niet aan toeval, noch aan de gemiddelde etmaalintensiteit, de verdeling van het verkeer over de rijstroken of het percentage vrachtverkeer worden toegeschreven. Echter ook niet aan de volgtijdverdeling, die niet significant verschillend was. Zie voor de "verklaring" par.

###### 4.2.2.

Brühning (1973) en Brühning & Hippchen (1975) hebben nagegaan of er binnen de categorie personenauto's, ingedeeld naar maximaal te rijden snel-

heid, verschillen bestaan in gedrag en ongevalsvatbaarheid. Voor de volgtijden bleek dat op een autosnelweg de snellere voertuigen duidelijk kortere volgtijden aanhielden, echter de daarop gebaseerde hypothese "snelle voertuigen zijn relatief vaker bij kop-staart-ongevallen betrokken, worden daarbij vaker schuldig geacht en botsen vooral tegen langzame voertuigen" wordt niet door ongevallengegevens bevestigd. Dit laatste kon, volgens de auteurs, ook veroorzaakt worden door het feit dat kop-staartongevallen vooral in spitsuren optreden en dat dan de snelle auto's, ten gevolge van hun afwijkende bestuurderspopulatie, relatief minder aan het verkeer deelnemen.

#### 4.2.2. Snelheden

Het idee dat snelheden in relatie staan tot veiligheid is vermoedelijk even oud als verkeer, in het bijzonder gemotoriseerd verkeer, en hier is dan ook vrij veel onderzoek naar verricht. In dit geval gaat het er om of er gegeven de gemiddelde snelheid nog andere eigenschappen van de snelheden zijn die voor de veiligheid van belang zijn.

Bij het in het voorgaande genoemde onderzoek van Beckmann (1969) op autosnelwegen bleken de relatief gevaarlijke wegvakken zich te onderscheiden van de relatief veilige door een grotere gemiddelde snelheid en een grotere standaardafwijking, welke twee factoren hier niet te scheiden waren.

In het veel geciteerde onderzoek van Solomon (1964) worden relaties tussen de snelheden van bij ongevallen betrokken voertuigen en ongevalsvatbaarheid en ernst onderzocht, op tweestrookswegen en vierstrookswegen met gescheiden rijbanen (geen autosnelwegen), buiten de bebouwde kom. Het bepalen van de snelheid in de pre-crash-fase is hierbij het moeilijke punt; gebruikt worden opgaven van de bestuurders en de politie. Het gaat hier dus om de snelheid, aan te duiden met pre-crashsnelheid, die gereden wordt voor dat de bestuurder op het komende ongeval anticipeert.

De belangrijkste resultaten van dit onderzoek zijn:

- a) het ongevallenquotiënt als functie van het verschil tussen pre-crashsnelheid en gemiddelde snelheid van de verkeersstroom ver-

loopt U-vormig met een minimum bij 0 tot 16 km/h positief verschil; dit geldt zowel overdag als 's nachts, in het laatste geval op een hoger niveau.

- b) de ernst van ongevallen neemt toe met de pre-crash-snelheid; dit geldt zowel voor het aantal personen met letsels als voor de materiële schade per aantal betrokken voertuigen (voor het aantal doden is het verloop ook hetzelfde, echter de aantallen zijn te klein voor een betrouwbare conclusie).
- c) het pre-crashsnelheidsverschil van twee bij een kop-staartongeval betrokken personenauto's is in het algemeen veel groter dan dat van twee willekeurige uit de verkeersstroom.

Uit het onderzoek van Solomon is later kritiek gekomen van White & Nelson (1970), die uitgaande van redelijk lijkende veronderstellingen omtrent de fouten bij het verzamelen van gereden snelheden voor het ongeval, die doorwerken in teller en noemer van het ongevallenquotiënt, aantonen dat dit kan leiden tot het gevonden U-vormige verband zonder dat dit reëel bestaat. Vermoedelijk is dit mede aanleiding geweest voor een soort herhaling van Solomon's onderzoek door het RTI (1970). Hierbij is getracht bovenstaande fouten te verkleinen en er bij de analyse rekening mee te houden. Gebleken is dat het betrokkenheidsquotiënt (aantal bij ongevallen betrokken voertuigen per afgelegde afstand) als functie van het verschil tussen pre-crashsnelheid en gemiddelde snelheid van de verkeersstroom U-vormig verloopt. Kwalitatief is dit dus hetzelfde resultaat als Solomon, kwantitatief is geen goede vergelijking mogelijk ten gevolge van de verschillen in klassen van de snelheidsverschillen en beoordeelde grootheden, maar wel is het effect bij Solomon veel sterker.

De ongevalsernst van ongevallen, waarbij één voertuig betrokken is, als functie van de pre-crashsnelheid is ook onderzocht door Beatty (1972) op wegvakken tussen kruisingen van "interstate highways" (dat zijn autosnelwegen). Het aantal gewonden per ongeval blijkt ongeveer lineair te stijgen met de pre-crashsnelheid, zowel voor diverse perioden, type botsingen als gebieden (wel en niet stedelijk). De verklaarde variantie is echter slechts 15 à 25%. Het aantal doden per ongeval is tot een snelheid van ca. 75 km/h onafhankelijk van de snelheid en stijgt daarna.

Van ongevallen bij dag waarbij twee voertuigen zijn betrokken is het pre-crash snelheidsverschil vergeleken met dat van twee willekeurige voertuigen uit de stroom; de gemiddelden zijn dan resp. ca. 32 en 15 km/h. Er is geen relatie gevonden tussen het pre-crash snelheidsverschil en de variantie van de snelheidsverdeling op het betreffende wegvak.

Snelheden van vrij rijdende voertuigen op wegen buiten de bebouwde kom blijken vaak normaal verdeeld te zijn. Als dit niet zo is zou dit een aanwijzing kunnen vormen voor een bijzondere situatie, die misschien ook minder veilig is. Mede op grond van een beschouwing omtrent de perceptie door bestuurders komt Krzeminski (1976) tot de hypothese dat bepaalde wegsituaties, die perceptueel moeilijk zijn, enerzijds leiden tot een niet normale snelheidsverdeling en anderzijds tot extra onveiligheid. Het samengaan van een niet normale snelheidsverdeling voor vrij rijdende voertuigen en relatief meer ongevallen is door Krzeminski inderdaad aangetoond, voor wegvakken van ca. 800 m lengte op tweestrookswegen. Een snelheidsverdeling is hierbij als niet meer normaal beschouwd indien de scheefheid groter dan een zekere waarde is. Tevens blijkt dat het gemiddelde en de variantie van de snelheidsverdeling het verschil in onveiligheid niet verklaren.

Globaal zijn de resultaten vanaf Solomon dus wel met elkaar in overeenstemming terwijl het eerdergenoemde van Beckmann er mogelijk een gevolg van is, immers bij een hogere gemiddelde snelheid en een grotere variantie zijn er meer voertuigen met een grotere afwijking van het gemiddelde en meer voertuigen met een hoge snelheid.

#### 4.2.3. Combinaties

Onderzoek naar de relaties tussen combinaties van mesoscopische kenmerken en onveiligheid is nog weinig verricht en er zijn dan ook slechts twee voorbeelden bekend.

Ludes & Siegner (1969) trachten in feite een relatie, die eerder is gevonden maar later is gepubliceerd (Leutzbach et al, 1970), tussen



de rijbaanintensiteit op een autosnelweg en het ongevallenquotiënt voor kop-staartongevallen te verklaren. Min of meer als Burkhardt (zie par. 3.3) maar wat eenvoudiger leiden zij uit de snelheden, voertuiglengte (en daaraan gekoppeld de maximale remvertraging) en de volgtijd van twee opeenvolgende voertuigen de maximaal toelaatbare responsietijd af, waarbij nog geen botsing optreedt als de voorligger plotseling maximaal vertraagt. Het blijkt dat deze responsietijd, gegeven de intensiteit, ongeveer lognormaal verdeeld is. Door vergelijking met een veronderstelde vaste beschikbare responsietijd volgt nu het aantal gevaarlijke volgers. Beschikbaar is dus het aantal kop-staartbotsingen en het aantal gevaarlijke volgers bij diverse intensiteiten; zie Afbeelding 5. Het quotiënt, d.w.z. het verwachte aantal kop-staartbotsingen gegeven de fractie onveilige volgers, blijkt niet constant te zijn. Het blijkt minimaal te zijn bij de intensiteit die het meest voorkomt en te stijgen bij grotere intensiteiten. Hieruit volgt dus dat het op deze wijze bepaalde aantal gevaarlijke volgers niet evenredig is met het aantal kop-staartbotsingen. Van belang is tevens dat de relaties kwalitatief gelijk blijven voor variaties in de voor alle voertuigen gelijke beschikbare responsietijd van 0,8 tot 1,6 seconden.

Pagano (1972) heeft in horizontale bogen van tweestrookswegen een relatie gevonden tussen het ongevallenquotiënt en een combinatie van snelheden en laterale posities van voertuigen in het begin (punt A) en het midden (punt B) van de boog.

De formule is:  $O.Q. = a + b \text{Var } y_B / \text{Var } y_A + c (u_A - u_B) u_A / X$ , met

- O.Q. = ongevallenquotiënt
- a, b, c = regressiecoëfficiënten
- Var  $y_A$  = variantie laterale positie in punt A
- $u_A$  = gemiddelde snelheid in punt A
- X = afstand tussen A en B

Hiermee wordt ca. 80% van de variantie in het O.Q. van de 9 bogen verklaard, die verschilden in straal, 44-230 m, etmaalintensiteit, 2400-5700 voertuigen, en O.Q. 3-50 ong./vtg.km. Het O.Q. had betrek-

king op een aaneengesloten periode terwijl de verkeersstroomkenmerken alleen verzameld zijn in werkdagnachten, bij droog weer en goed zicht en alleen van vrij rijdende personenauto's in de buitenbocht. Voor de binnenbocht geldt de relatie niet; een mogelijke verklaring is dat de ongevalsvatbaarheid van voertuigen in de buitenbocht overheerst. Behalve de gevonden verklarende factoren is ook onderzocht of de snelheidsdaling  $u_A - u_B$ , de scheefheid van de snelheidsverdeling in B, de variantie van de snelheden of de gemiddelde snelheid het O.Q. konden voorspellen, echter zonder resultaat.

De gevonden formule kan geïnterpreteerd worden als een relatie tussen mate van homogeniteit van verkeersstroomkenmerken en onveiligheid; bij stricte homogeniteit is  $\text{Var } y_B = \text{Var } y_A$  en  $u_A = u_B$  en dus het O.Q. = a + b. Deze waarde stemt inderdaad redelijk overeen met die van een recht gedeelte van hetzelfde type weg.

Niet vermeld wordt of getracht is de variatie in het O.Q. te verklaren met geometrische kenmerken van de boog (bv. straal, verkanting, hoekverdraaiing).

#### 4.3. Relatie met afwikkeling

Afwikkeling wordt meestal beschreven in termen van macroscopische verkeersstroomkenmerken, zoals prestatie, reistijd, doorstroming en afwikkelingsniveau. Deze kenmerken volgen min of meer direct uit de mesoscopische; bijvoorbeeld uit de snelheidsverdeling volgt de gemiddelde snelheid en uit de volgtijdverdeling de intensiteit.

Speciale vermelding verdient de reistijd als men die relateert aan de lokaal geobserveerde snelheden.

Beschouw een wegvak waarop de verkeersstroomtoestand, gekarakteriseerd door intensiteit, dichtheid en lokale snelheidsverdeling, homogeen en stationair is, d.w.z. niet afhankelijk van plaats en tijd. De reistijd van alle voertuigen over het wegvak hangt nu niet alleen af van het gemiddelde van de lokale snelheden  $u$ , maar ook van de verdeling van de snelheden daarom heen. Dit is eenvoudig in te

zien. Stel er zijn twee voertuigen die  $\Delta$  van  $u$  afwijken in tegengestelde richting. De reistijd van deze voertuigen is dan evenredig met  $1/(u-\Delta) + 1/(u+\Delta) = 1/(u-\Delta^2/u)$ , met andere woorden groter naarmate  $\Delta$  groter is. Dit wordt wel ruwweg aangeduid met de stelling: naarmate de snelheden bij eenzelfde gemiddelde meer spreiden is de reistijd groter. De toevoeging locale bij de snelheden ontbreekt dan, terwijl die toch essentieel is omdat de reistijd wel evenredig is met het omgekeerde van de momentaan gemiddelde snelheid. Overigens is de fout die men maakt door de reistijd evenredig te stellen aan het omgekeerde van de lokaal gemiddelde snelheid niet zo groot. Zo is bij een snelheidsverdeling met een variatiecoëfficiënt van 0,2, dat wil zeggen dat de standaardafwijking 20% van het gemiddelde bedraagt, de fout ca. 4%.

## 5. TOEPASSINGEN

### 5.1. Inleiding

Bij het treffen van maatregelen met het doel de kwaliteit van het verkeer te verbeteren kan men de fasen indicatie, ontwerp, uitvoering en evaluatie onderscheiden. Behalve in gevallen waarbij precies bekend is wat de relatie is tussen maatregel en effect, is het hierbij vaak noodzakelijk het gedrag van de verkeersdeelnemers als "tussenschakel" op te nemen, omdat meestal de maatregel via een gedragsverandering een kwaliteitsverbetering beoogt. Bepaalde aspecten van het gedrag worden beschreven met behulp van de in dit deelrapport behandelde mesoscopische verkeersstroomkenmerken en kunnen dus van belang zijn bij het treffen van maatregelen. In het volgende worden hiervan een aantal voorbeelden besproken die dit illustreren. Hierbij is er vanaf gezien een indeling in indicatie, ontwerp en evaluatie aan te houden. De maatregel snelheidslimieten zal apart behandeld worden.

### 5.2. Voorbeelden

- Gedragsregel met betrekking tot het afstand houden.

In Nederland moet, volgens de wegenverkeerswetgeving (Art. 49.2) de bestuurder in staat zijn zijn voertuig tot stilstand te brengen binnen de afstand waarover hij de weg kan overzien en waarover deze vrij is. Bij verkeer op auto(snel)wegen zou dit voorschrift gegeven de snelheid tot een bepaalde minimale afstand of volgtijd leiden, bv. bij 90 km/h en een remvertraging van  $5 \text{ m/s}^2$  tot een netto volgtijd van 2,5 s. Praktisch blijkt dat dit voorschrift, zeker bij druk verkeer, niet nageleefd en ook niet door de politie gecontroleerd wordt. In West-Duitsland wordt aanbevolen bij het afstand houden op snelwegen de regel "halbe Tacho" toe te passen, dat wil zeggen een netto afstand (in m) aan te houden die groter of gelijk is aan de helft van de snelheid (in km/h), wat overeenkomt met een netto volgtijd van 1,8 s. Voor wat betreft de controle, Lenz (1973), geldt dat iemand in overtreding is als gedu-

rende minstens 300 m en bij een snelheid groter dan 80 km/h de netto volgtijd kleiner dan 0,8 s is. Deze regel wordt gecontroleerd al zal het duidelijk zijn dat een waterdichte bewijsvoering vrij veel inspanning kost. De motivering voor deze maatregel is het grote aantal kop-staartongevallen en de overtuiging, mede gefundeerd op het onderzoek van Burkhardt (1966) en anderen naar het volgedrag, dat dit aan onvoldoende afstand houden is te wijten.

- Simulatie.

Bij een gecompliceerd verschijnsel als een verkeersstroom kan simulatie, met name bij het ontwerp van diverse maatregelen, een nuttig hulpmiddel zijn. Bij simulatie moet men dan in dit geval denken aan het nabootsen van de bewegingen van de voertuigen volgens een aantal regels, zowel deterministische als die waarin toevalselementen een rol spelen. Als voorbeeld kan genoemd worden een algemene opzet voor een simulatie van een verkeersstroom op een rijbaan van een autosnelweg van Van Basten (1973). Zowel bij de ingang van het model, waar de voertuigen het beschouwde wegvak binnen rijden met een zekere snelheid en volgtijd, als bij de vergelijking van model met realiteit spelen de mesoscopische verkeersstroomkenmerken een rol. Simulatiemodellen worden uitvoeriger in Deel VIII behandeld.

- Evaluatie snelheidsreducerende maatregelen.

Bij wegwerkzaamheden op autosnelwegen zal men meestal het aantal rijstroken handhaven door ze smaller te maken en de vluchtstroken te gebruiken voor rijdend verkeer. De overgang van de normale naar de tijdelijke configuratie blijkt in West-Duitsland ca. tien maal zo onveilig als de normale rijbaan. Met deze motivering is onderzocht, zie Lenz & Steinhoff (1972), hoe men de voertuigen beter kan doen gehoorzamen aan de maximale snelheid van 60 km/h die ter plaatse geldt. Het is duidelijk dat een geschikt criterium in dit geval de snelheidsverdeling is, echter tevens is onderzocht of het volgedrag, met name de fractie onveilige volgers, verandert.

Een drietal maatregelen zijn onderzocht:

- . Schijnbaar smallere rijbaan door middel van bakens.

Bij daglicht daalden de snelheden en de fractie onveilige volgers,

bij duisternis stijgen ze.

. Extra bord met de maximum snelheid en "Achtung" boven de rijbaan dat alleen zichtbaar wordt als een voertuig sneller dan 60 km/h rijdt.

Het korte termijn effect was een daling van de snelheden, het lange (3 maanden) geen verandering. De fractie onveilige volgers daalde en wel toenemend in de tijd.

. Zichtbaar opgestelde politieauto met bemanning (geen controle-activiteit). De snelheden daalden en de fractie onveilige volgers veranderde niet duidelijk. Alleen het korte-termijneffect werd onderzocht.

### 5.3. Snelheidslimieten

Globaal gesteld worden snelheidslimieten, waaronder hier tevens richtsnelheden zullen worden verstaan, ingevoerd in de verwachting dat dit het snelheidsgedrag zal veranderen en tevens de onveiligheid zal doen afnemen. Deze verwachtingen zijn o.a. gebaseerd op onderzoekresultaten als de in het voorgaande behandelde van Solomon (1964), RTI (1970) en Beatty (1972). Tevens is er in de loop der tijden veel onderzoek geweest naar de relatie tussen snelheidslimieten en gerealiseerde onveiligheid, zij het dat hiervan weinig overblijft als men methodologische eisen stelt. Een recente uitzondering met betrekking tot het doel van snelheidslimieten is de maximum snelheid van 70 km/h op een autosnelweg in Amsterdam, die de geluidshinder moet verminderen.

Er bestaan diverse soorten snelheidslimieten, in te delen naar rechtskracht, begrenzing (max, min), geldigheid (tijd, plaats); zie SWOV (1971). Het meeste komt de permanente verplichte maximum snelheid voor, met als inherent nadeel het niet aangepast zijn aan wisselende verkeers- en overige omstandigheden. Hieraan tegemoet komen de snelheidslimieten die afhankelijk van verkeers- en/of atmosferische omstandigheden of als onderdeel van een verkeerslichtenregeling worden ingeschakeld. In Nederland zijn hiervan de volgende typen in gebruik of in gebruik geweest:

. Beveiliging van files stroomopwaarts van flessehalzen in autosnelwegen door middel van afpellende adviessnelheden, gestuurd door de verkeersstroomtoestand die afgeleid wordt uit locale snelheden en volgtijden; Klijnhout & Jenezon (1973).

. Als onderdeel van bovengenoemd systeem worden adviessnelheden gegeven, vanaf zekere intensiteiten zonder dat nog van filevorming sprake is, in de verwachting dat hierdoor de snelheidsspreiding zal verminderen en de verkeersstroom ongevoeliger voor storingen wordt.

. Adviessnelheden in een groene golf (zie Takes, 1965) en er aan voorafgaand (groene trechter, zie Slop, 1966), die bij opvolging groen licht garanderen op de volgende kruising.

. Een adviessnelheid van 50 km/h op een rurale tweestrooksweg als voorsein stroomopwaarts van een in een boog gelegen kruising met verkeerslichten, die bij opvolging garandeert dat men nog voor het rode licht kan stoppen (Fortuin, 1974).

Opgemerkt moet worden dat nog weinig resultaten bekend zijn van eventuele evaluatie van deze systemen.

Op de algemene problematiek van snelheidslimieten zal hier niet verder ingegaan worden; verwezen kan worden naar de bronnen SWOV (1971) en OECD (1972). Opgemerkt kan nog worden dat de overtuiging, die in de Verenigde Staten al vanouds bestaat, dat op alle wegtypen permanente maximum (en op sommige ook minimum) snelheden moeten gelden veld wint, zie bv. Janssen (1974). In Nederland is dit inmiddels gerealiseerd, slechts het niveau op de autosnelwegen is nog in discussie.

Voor wat betreft de relatie tussen maatregel en gedrag is het relevant dat snelheidslimieten behalve op de snelheden ook invloed kunnen hebben op andere verkeersstroomkenmerken, te weten:

- . intensiteit, bv. als gevolg van het uitwijken naar wegen zonder limiet;
- . volgtijden en afstanden;
- . snelheidsverschillen tussen opeenvolgende voertuigen;
- . samenhangend met de laatste twee: clusters en potentieel gevaarlijke volgers;
- . aantal en kenmerken (bv. duur) van inhaalmanoeuvres.

In het voorgaande is reeds genoemd dat op Westduitse autosnelwegen gebleken is dat de gemiddelde clusterlengte en het aantal potentieel gevaarlijke volgers ten gevolge van een starre maximum snelheid daalt.

Op Westduitse tweestrookswegen buiten de bebouwde kom is in oktober 1972 een algemene maximumsnelheid van 100 km/h ingesteld ("Tempo 100"); zie Büschges et al (1975). In een voor- en nastudie is hiervan het effect op de onveiligheid en het verkeersgedrag onderzocht. Voor wat betreft de onveiligheid wordt een daling geconstateerd, waarbij bedacht moet worden dat er in de onderzoeksperiode enige "storende" factoren zijn opgetreden, waaronder de energiecrisis. De storende factoren worden geanalyseerd en leiden tot de conclusie dat er een positief effect van Tempo 100 op de veiligheid overblijft. Voor wat betreft het verkeersstroomgedrag is gevonden:

- . van de locale snelheidsverdelingen dalen de gemiddelden vrijwel niet maar wel de hogere snelheden;
- . de gemiddelde reissnelheden (over een wegvak) dalen uitsluitend voor wegen waarvan de ontwerpsnelheid grotendeels meer dan 100 km/h is;
- . het aantal clusters, waarbij voor de afhankelijkheid van de intensiteit gecorrigeerd wordt, stijgt maar het aantal voertuigen in een cluster niet;
- . het aantal korte volgafstanden verandert niet.

Zackor (1972) heeft het effect op de verkeersstroom van verplichte maximum snelheden onderzocht, die op de rijbaan van de autosnelweg Salzburg-München, door de politie worden ingeschakeld bij grote drukte. Op grond van observaties op een doorsnede, bij goede weersomstandigheden en met uitsluitend personenauto's, wordt omtrent het effect het volgende geconstateerd:

- . het basisdiagram verandert, de capaciteit wordt groter en treedt bij een grotere dichtheid op; dit betekent o.a. dat in een bepaald dichtheidsgebied de lokaal gemiddelde snelheid met maximum snelheid groter wordt;
- . de standaardafwijking van de locale snelheidsverdeling en de snelheidsverschillen tussen opeenvolgende voertuigen worden kleiner en minder dichtheidsafhankelijk;



. de fractie volgtijden kleiner dan 1 seconde wordt kleiner. Omdat bovendien het effect op de veiligheid gunstig lijkt te zijn (niet-significante daling in onderzoekgebied en significante stijging in, voor discussie vatbaar, controlegebied) is het duidelijk dat het oordeel over deze maatregel positief uitvalt.

Tot slot verdient een onderzoek naar het effect van minimum snelheden vermelding omdat van deze maatregel vaak zonder nader onderzoek wordt aangenomen dat ze positief werkt, met name in analogie met een maximum snelheid de spreiding van de snelheden vermindert. Wingerd (1968) heeft het effect van verplichte minimum snelheden onderzocht op 4, 6 en 8 strooks autosnelwegen. De limieten golden voor een rijstrook en waren hoger naarmate de rijstrook meer naar links gelegen was. De bedoeling was de verkeerskwaliteit te verbeteren bij hoge afwikkelingsniveaus.

Het effect hiervan was dat:

- . meer voertuigen de linker stroken gingen gebruiken;
- . de gemiddelde snelheden wat lager werden;
- . meer korte volgtijden voorkwamen;
- . meer strookwisselingen optraden.

Omdat bovendien de controle op de naleving moeilijk was, viel het oordeel over deze maatregel negatief uit. Het effect op de veiligheid is niet onderzocht.

Uit dit onderzoek volgen geen algemene conclusies over het effect van minimum snelheden en dus ook niets over de in Nederland geldende verplichte minimum snelheid op autosnelwegen. Wel blijkt er uit dat een maatregel soms een nogal averechts effect kan hebben.

## 6. SLOTBESCHOUWING

### 6.1. Conclusies

Van de mesoscopische verkeersstroomkenmerken worden vooral de verdelingen gebruikt. Kenmerken waarbij de volgorde in tijd of plaats een rol speelt worden nog niet veel toegepast.

#### Volgtijden en volgafstanden

- Voor volgtijden en volgafstanden zijn een groot aantal mathematische verdelingen gesuggereerd. Bij kleine intensiteit en in het algemeen ook voor de staart van de verdeling voldoet de exponentiële verdeling vrij goed; bij grotere intensiteit lijkt de lognormale verdeling wel geschikt, die flexibel en relatief eenvoudig hanteerbaar is. De combinaties van verschillende verdelingen hebben theoretisch aantrekkelijke eigenschappen, ze zijn echter praktisch moeilijk hanteerbaar ten gevolge van de vele parameters en de benodigde opsplitsing van de verkeersstroom in delen.
- Opeenvolgende volgtijden en afstanden blijken op autosnelwegen geheel of vrijwel onafhankelijk te zijn, op enkelbaanswegen buiten de bebouwde kom zijn de onderzoeksresultaten strijdig.
- Bij toenemende intensiteit dalen de gemiddelde volgtijd (per definitie) en de variantie en van de percentielen de hoge het meest.
- Een mogelijke relatie tussen volgtijden of volgafstanden op zich en onveiligheid is nog slechts beperkt onderzocht en dit heeft niet tot resultaten geleid.

#### Snelheden

- Van snelheden wordt meestal aangenomen dat ze normaal verdeeld zijn en dit blijkt in veel gevallen ook vrij goed te kloppen. Bij duidelijke afwijkingen hiervan bestaat er een aantal alternatieven, waar binnen nog geen duidelijke favoriet is aan te wijzen.
- Opeenvolgende snelheden zijn in sterke mate afhankelijk als de bijbehorende volgtijden kleiner dan een zekere grenswaarde zijn.

- In het gebied voor dichtheden kleiner dan de kritische (capaciteitsdichtheid) neemt bij toenemende intensiteit de variantie van de snelheden af.
- Over het effect van diverse factoren als wegkenmerken en omstandigheden op de snelheden is weinig algemeen te zeggen, vermoedelijk ten gevolge van het grote aantal factoren en de interacties daar tussen. Slechts met behulp van meer geavanceerde analysetechnieken, dan in verkeersonderzoek meestal worden toegepast, is wel iets te bereiken, zoals het behandelde onderzoek van O'Flaherty (1971) toont. Op landelijke enkelbaans tweestrookswegen buiten de bebouwde kom is vooral het horizontaal en verticaal profiel van belang voor de snelheden.
- Gezien op lange termijn vertonen snelheden een stijgende trend, zij het soms met onderbrekingen.
- De relatie tussen snelheden en onveiligheid is veelvuldig onderzocht en dit heeft tot twee belangrijke resultaten geleid:
  1. voertuigen die veel afwijken van de gemiddelde snelheid zijn relatief vaker bij ongevallen betrokken; een grote variantie van de snelheden is dus ongunstig;
  2. de ernst van ongevallen neemt met de pre-crash snelheid toe.Hiermee zijn twee belangrijke argumenten voor het instellen van maximum snelheden gevonden.

### Combinaties

- Bij elkaar behorende volgtijden of afstanden en snelheden van opeenvolgende voertuigen worden gebruikt bij een opdeling van de verkeersstroom in "vrije" en "gebonden" voertuigen. De gebonden voertuigen rijden hierbij in een cluster, een begrip dat nog niet eenduidig wordt gehanteerd maar globaal gesproken een aantal voertuigen is dat met korte volgafstanden en geringe snelheidsverschillen rijdt. Er bestaat behoefte aan duidelijke en operationele definities van begrippen als cluster, file, verkeersgolf e.d. Meestal wordt clustering als een negatieve eigenschap van de verkeersstroom gezien omdat er een belemmering voor de verkeersdeelnemers in tot uiting komt. In hoeverre clustering een geschikte maatstaf

is en/of te prefereren boven andere voor dit kwaliteitsaspect van het verkeer is nog onbekend. Bij simulaties is een beschrijving van de verkeersstroom in termen van clusters mogelijk ook bruikbaar. Het onderzoek van clusters is echter tot nu toe voornamelijk beperkt gebleven tot verkenningen.

- Incidenteel is een sterke samenhang gevonden tussen het ongevallenquotiënt in horizontale bogen van tweestrookswegen en een functie van varianties van laterale posities en gemiddelde snelheden in begin en midden van de boog. Dit resultaat is mogelijk bruikbaar bij evaluatie van markering en signalering in bogen.

- Het beoordelen van combinaties van snelheden en volgafstanden in termen van potentiële kop-staartbotsingen is theoretisch en praktisch mogelijk, een relatie met optredende ongevallen is echter nog niet aangetoond.

## 6.2. Evaluatie

Van de verdelingen van volgtijden, volgafstanden en snelheden is vrij veel bekend. Inzicht in de onderlinge afhankelijkheden, zowel tussen opeenvolgende waarden van hetzelfde kenmerk als tussen verschillende kenmerken, is nog beperkt.

Onderzoek naar de relaties tussen mesoscopische verkeersstroomkenmerken en onveiligheid heeft als belangrijkste resultaat sterke aanwijzingen opgeleverd dat er een positief verband is tussen de variatie van locale snelheden en onveiligheid. Bedacht moet worden dat onderzoek van dit type relaties praktisch slechts bij benadering uitvoerbaar is. Gegeven de globale wegkenmerken, omstandigheden, bestuurders- en vaste voertuigkenmerken en macroscopische verkeersstroomkenmerken, dient men de overblijvende variaties in onveiligheid en mesoscopische verkeersstroomkenmerken aan elkaar te relateren.

Kennis van mesoscopische verkeersstroomkenmerken wordt toegepast bij diverse maatregelen die de kwaliteit van het verkeer beogen te verbeteren. Dit kan gebeuren in aanvulling op het gebied van macroscopische verkeersstroomkenmerken als deze niet voldoende ge-

detaillieerd zijn of als de maatregel speciaal gericht is op het veranderen van mesoscopische kenmerken. Het meest wordt de snelheidsverdeling van locale snelheden gebruikt, omdat die relatief eenvoudig te verkrijgen is en vele maatregelen direct of indirect de snelheden beïnvloeden.

Voor wat betreft maximum snelheden is het probleem langzamerhand, met name binnen Nederland, niet het al of niet invoeren, maar het niveau van de limiet. Minimum snelheden komen alleen in aanmerking voor auto(snel)wegen en staan nauwelijks meer ter discussie, hoewel er weinig empirisch onderzoek naar gedaan is.

Variabele adviessnelheden of limieten op belangrijke aders zijn in opkomst en lijken een positief effect te hebben, wat wellicht nog te verhogen is door ze behalve van de verkeersstroomtoestand ook van atmosferische en wegdektoestanden afhankelijk te maken. Zowel voor een juiste indicatie, een goed ontwerp als een betrouwbare evaluatie van deze maatregelen, die veelal onderdeel zullen zijn van een verkeersbeheersingssysteem, is nog veel onderzoek nodig.

### 6.3. Geïndiceerd onderzoek

Op grond van het voorgaande zijn de volgende, globaal te omschrijven onderzoeken, geïndiceerd:

- Onderzoek van de relaties tussen mesoscopische verkeersstroomkenmerken en onveiligheid. Samen met kennis van de relaties tussen te manipuleren factoren, zoals wegkenmerken, en mesoscopische verkeersstroomkenmerken kan dit leiden tot de indicatie van veiligheidsbevorderende maatregelen.

Tevens is het mogelijk dat op deze manier verklaringen van aange-  
toonde relaties tussen macroscopische verkeersstroomkenmerken en onveiligheid worden gevonden.

- Het vaststellen van het effect van maatregelen die de snelheden direct trachten te beïnvloeden, niet alleen op snelheden maar ook op andere mesoscopische verkeersstroomkenmerken. Dit is vooral nodig voor de nieuwe, niet permanente maar bijvoorbeeld verkeersafhankelijke, snelheidsbeïnvloedende maatregelen.

- Onderzoek van de relaties tussen wegkenmerken en snelheden. Dit

is van belang voor het beheersen van de snelheden met behulp van het wegontwerp.

- Nagaan of de capaciteit van aders te voorspellen is uit de verdeling van de volgtijden, wellicht in combinatie met snelheden, gemeten bij intensiteiten ongelijk aan de capaciteit. Dit is van belang omdat in veel gevallen de capaciteit van aders nog niet nauwkeurig genoeg bekend is.

- Onderzoek van de verdelingen, zowel de marginale als de simultane, van snelheden, snelheidsverschillen, volgtijden enz. Dit is met name van belang voor microscopische simulatiemodellen.

## TABELLEN

### Nr.    Bijschrift

- 1        Onderzoek volgtijden en volgafstanden
- 2        Onderzoek snelheden
- 3        Onderzoek combinaties

## AFBEELDINGEN

### Nr.    Bijschrift

- 1        Schatting volgafstand uit volgtijd en locale snelheden
- 2        Kansdichtheden volgtijden
- 3        Kansdichtheden snelheden
- 4        Kansdichtheden clusterlengten
- 5        Kop-staartongevallen en fractie gevaarlijke volgers als functie van de rijbaanintensiteit. Bron: Ludes & Siegener (1969).

Bron	Jaar	Weg	Verdeling		Effect intensiteit	Diversen
			globaal	type		
Breiman	69	AS			X	afhankelijkheid
Brühning	73	AS				voertuigkenmerk
Caminada	73	AS	X		X	
Cowan	75	1-b 2-s				afhankelijkheid
Dawson	69	1-b 2-s		X	X	
Erlander	71	1-b 2-s		X		
Greenberg	66	AS, tunnel		X		
HRB	65	diverse	X	X	X	
LVV	65	AS	X		X	snelheidslimiet
May	65	AS		X	X	
Miller	70	1-b 2-s				afhankelijkheid
Munjal	73	AS			X	afhankelijkheid
Storost	74	AS		X	X	
Tolle	69	AS		X	X	
Wasielowski	74	AS		X	X	
Zackor	72	AS	X		X	snelheidslimiet

#### Verklaring

AS autosnelweg

1-b 2-s rurale enkelbaansweg met twee rijstroken

Tabel 1. Onderzoek volgtijden en volgafstanden



Bron	Jaar	Weg	Verdeling		Effect intensiteit	Diversen
			globaal	type		
Brühning	73	AS				voertuigkenmerk
Eaton	74	AS	X			trend
HRB	65	diverse	X		X	
Lamm	71	AS, 1-b 2-s		X	X	dag/nacht, nat/ droog, boogstraal
Munjal	73	AS		X	X	afhankelijkheid
OECD	72	1-b 2-s	X			trend
O'Flaherty	71	1-b 2-s	X		X	kenmerken bestuur- der, weg, voer- tuig, verkeer, om- standigheden
Oppenlander	66	diverse			X	als O'Flaherty
Pahl	71	AS		X	X	afhankelijkheid
Schlums	66	AS		X	X	dag/nacht
Schlums	69	AS	X		X	snelheidslimiet
Wolff	66	AS	X		X	wegkenmerken
Zackor	72	AS	X		X	snelheidslimiet

Verklaring

AS autosnelweg

1-b 2-s rurale enkelbaansweg met twee rijstroken

Tabel 2. Onderzoek snelheden

Bron	Jaar	Combinatie	Weg	Effect intensiteit	Onderwerp
Athol	65	series $\tau$	AS	X	clusters, interne $\tau$
Burkhardt	66	$\tau, v, \Delta v$ , vtg. cat.	AS	X	volggedrag, snelheidslimiet, rijstrook
Caminada	73	$\tau, v, \Delta v$	AS	X	afhankelijkheid
Hoeven, ter	71	series $\tau, v, \Delta v$			clusters, volggedrag
Montroll	61	series s	tunnel		clusters, $\bar{c}$ , dichtheid
Pahl	71	$\tau, v, \Delta v$	AS	X	afhankelijkheid
Schlums	66	series $\tau$	AS	X	clusters, $\bar{c}$ , snelheidslimiet, % vrachtverkeer, rijstrook,
Schlums	69	$\tau, v, \Delta v$ , vtg. cat.	AS	X	volggedrag, snelheidslimiet, % vrachtverkeer
Taylor	74		1-b 2-s		verdeling clusterlengten
Underwood	63	series $\tau, \Delta v$	diverse	X	verdeling clusterlengten, interne $\tau$ , afhankelijkheid rijstrook

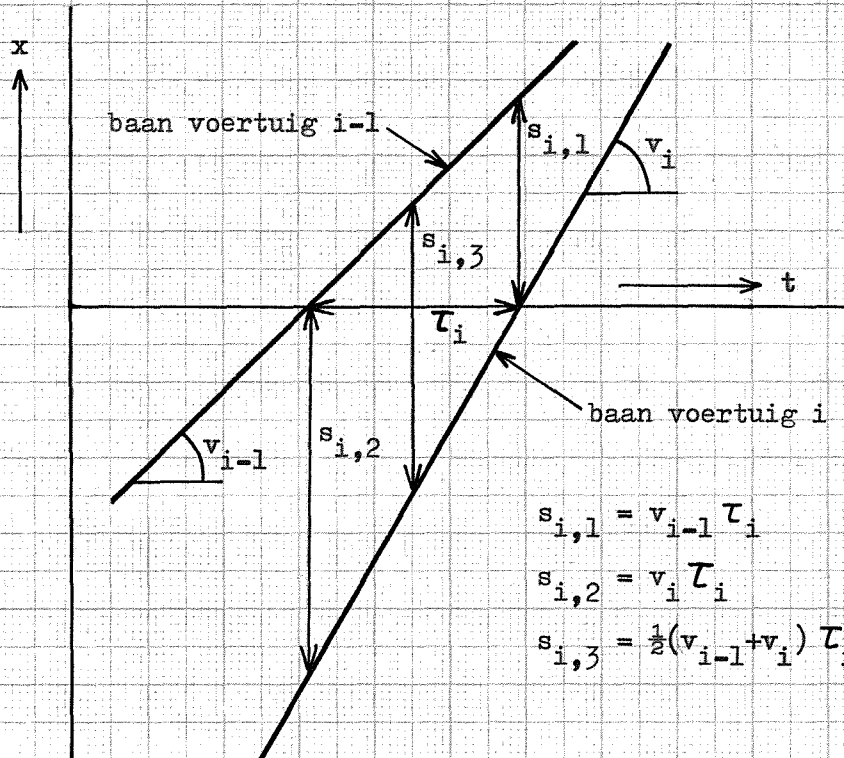
Verklaring

AS autosnelweg

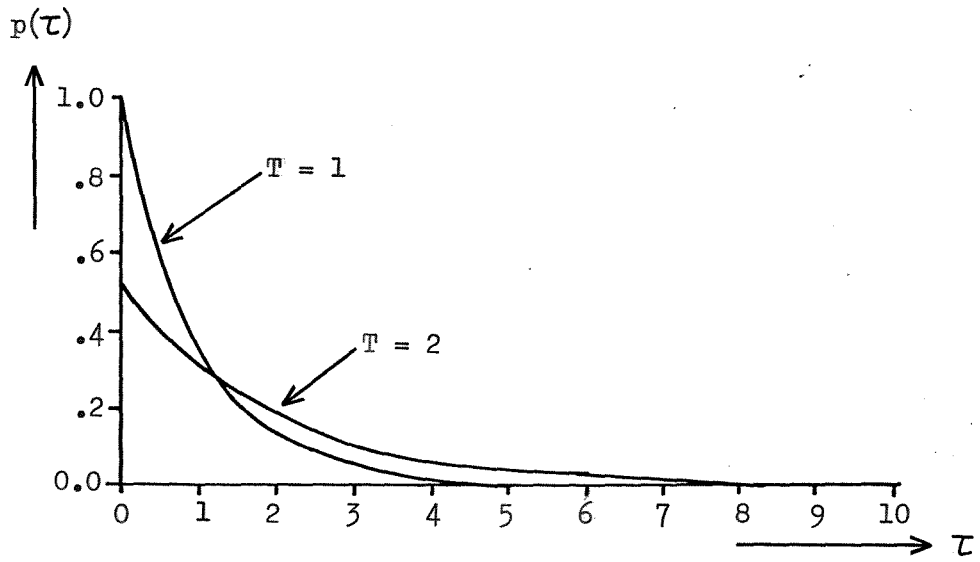
$\bar{c}$  gem. clusterlengte

vtg.cat. voertuigcategorie

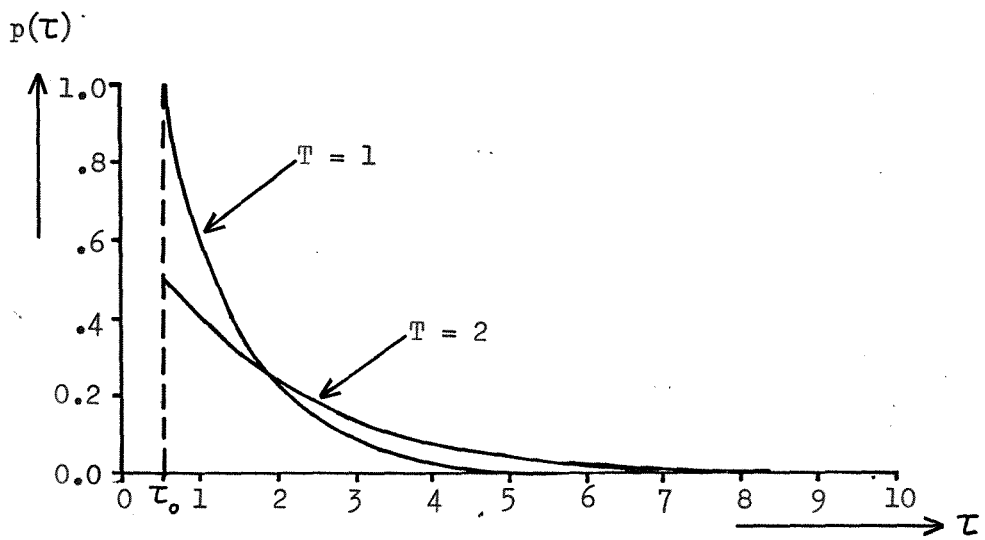
Tabel 3. Onderzoek combinaties



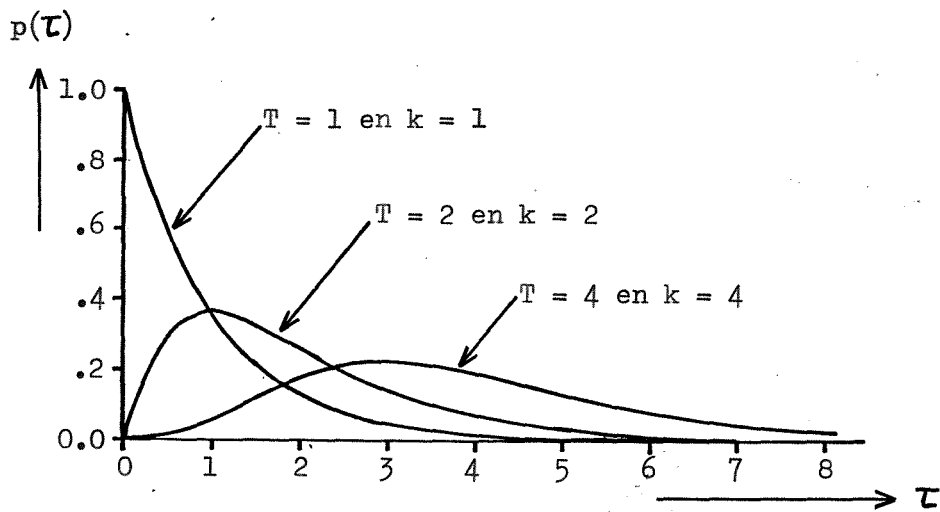
Afbeelding 1. Schatting volgfafstand uit volgtijd en locale snelheden.



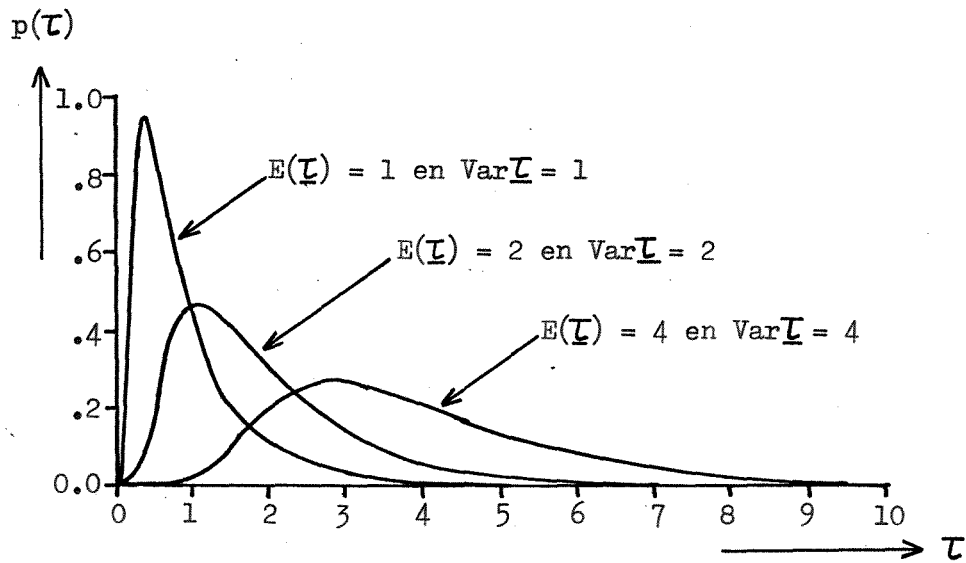
Afbeelding 2a. Exponentiële kansdichtheid.



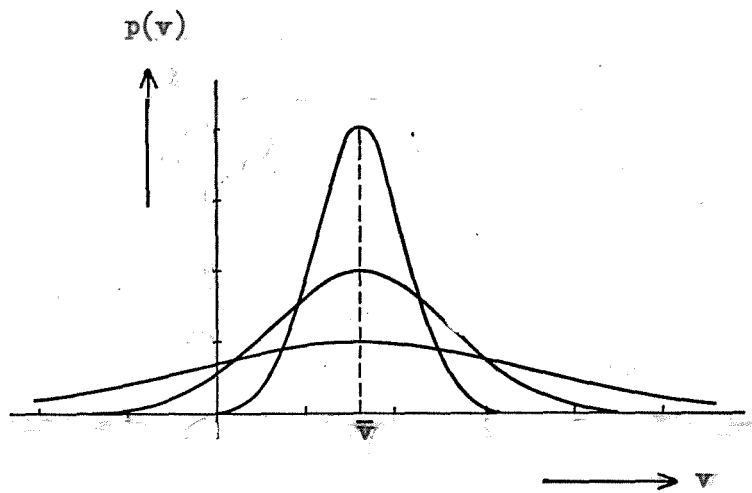
Afbeelding 2b. Vershoven exponentiële kansdichtheid.



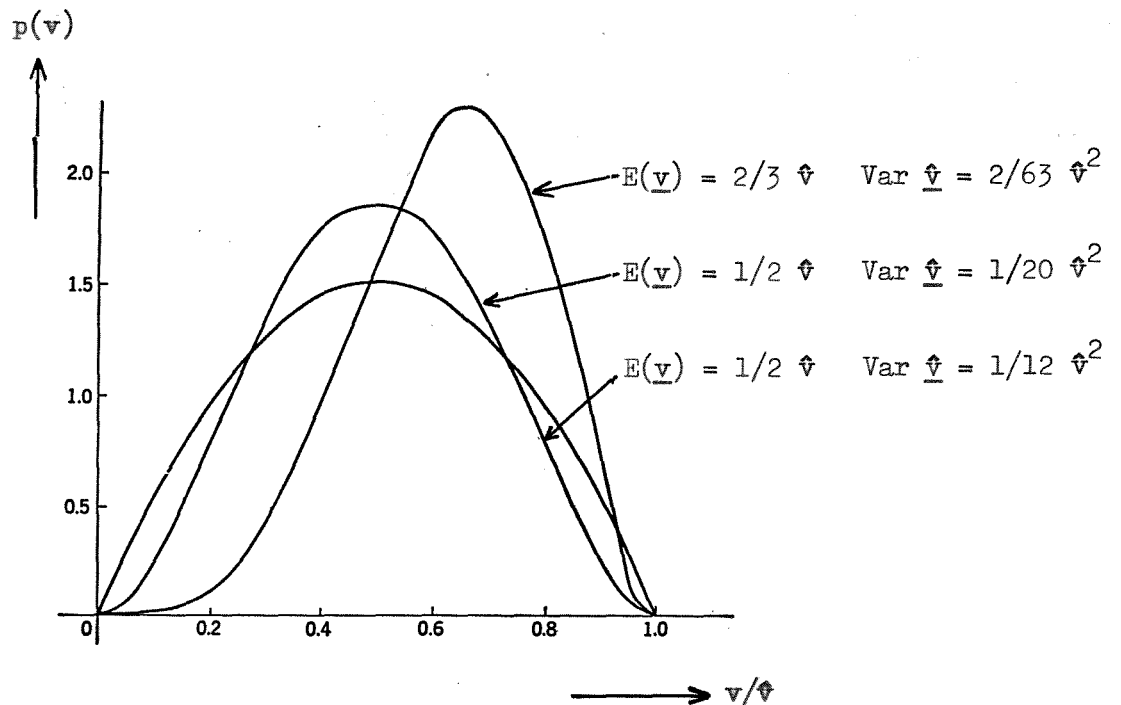
Afbeelding 2c. Gamma kansdichtheid.



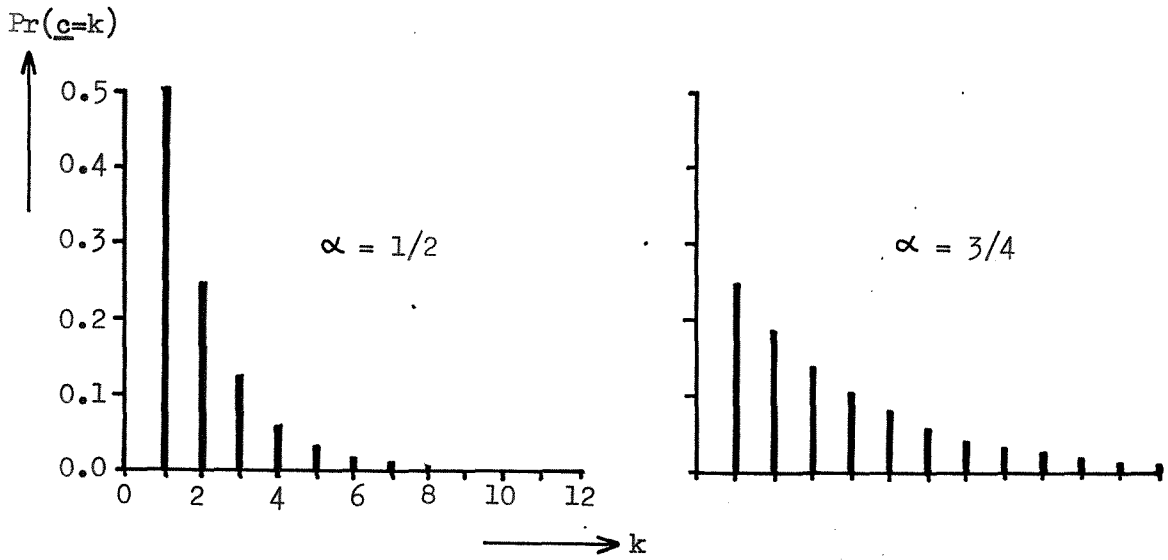
Afbeelding 2d. Lognormale kansdichtheid.



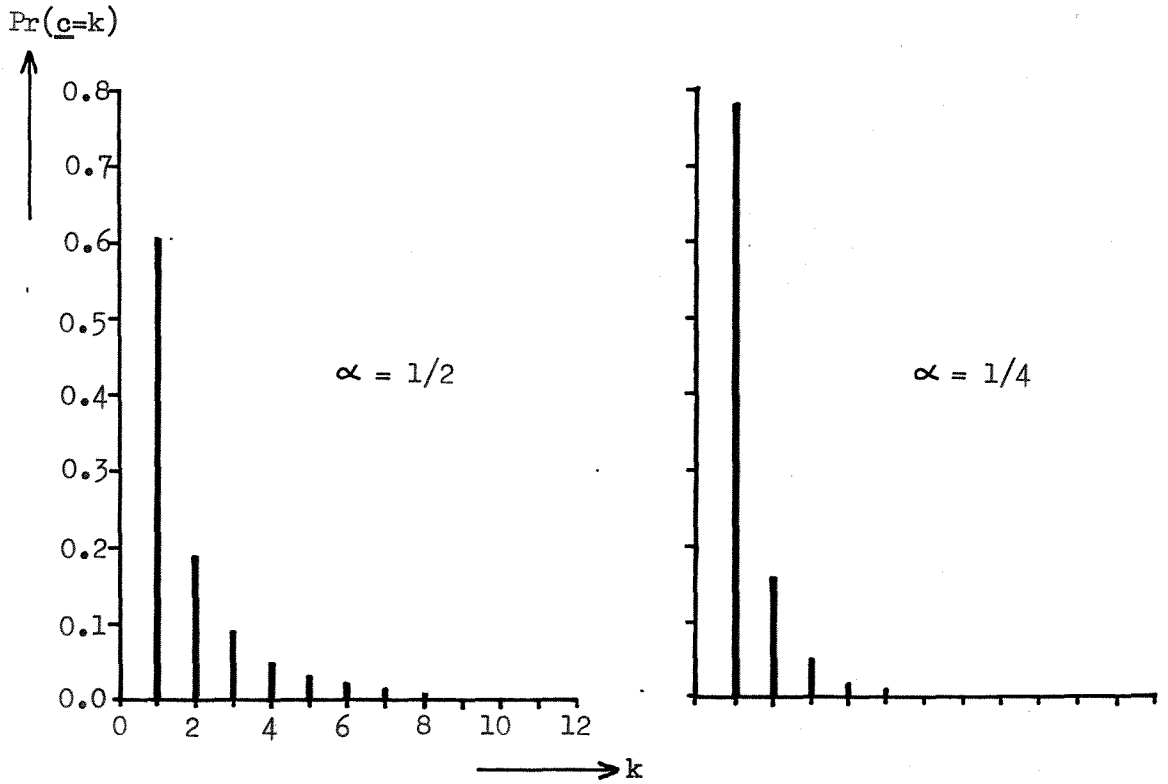
Afbeelding 3a. Normale kansdichtheid.



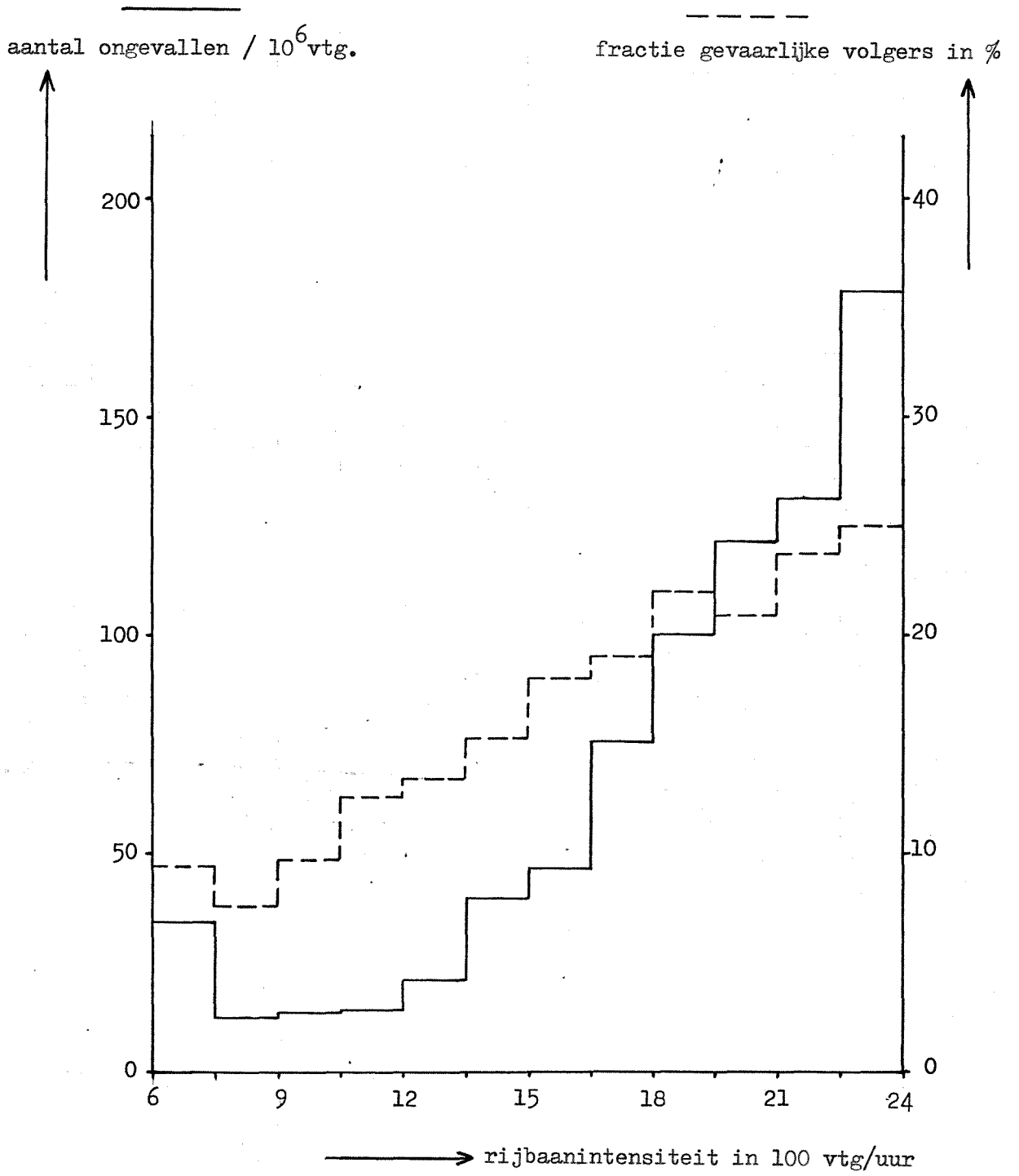
Afbeelding 3b. Beta kansdichtheid.



Afbeelding 4a. Geometrische kansdichtheid.



Afbeelding 4b. Borel-Tanner kansdichtheid.



Afbeelding 5. Kop-staart ongevallen en fractie gevaarlijke volgers als functie van de rijbaanintensiteit. Bron: Ludes & Siegener (1969).



## LITERATUUR

Athol, P. Headway groupings. Highway Research Record 72. Highway Research Board. Washington, 1965.

Basten, F.T. van. Simulatie van verkeersstromen. De Ingenieur 85 (1973) 13: 268-271.

Beatty, R.L. Speed analysis of accidents on interstate highways. Public Roads 37 (1972) 3: 89-102.

Beckmann, L. Untersuchungen über Unfallzahlen und Kenngrößen des Verkehrsablaufs auf Autobahnstrecken in Nordrhein-Westfalen. Techn. Univ. Berlin, 1969.

Bendat, J.S. & Piersol, A.G. Measurement and analysis of random data. Wiley, New York, 1966.

Brühning, E. Zum Verkehrsverhalten in Abhängigkeit vom gefahrenen Fahrzeugtyp. Strassenverkehrstechnik 17 (1973) 3: 85-90.

Brühning, E. & Hippchen, L. Zur Unfallbeteiligung schneller und langsamer Fahrzeuge. Polizei, Technik und Verkehr 20 (1975) 2: 50-59.

Breiman, L.; Gafarian, R.; Lichtenstein, R.; Murthy, V.K. An experimental analysis of single-lane time headways in freely flowing traffic. In: Leutzbach, W. & Baron, P. (ed.). Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 86. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969.

Burkhardt, F. Beurteilung der Kraftfahrzeugabstände auf Bundesautobahnen. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 46. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1966.

Büschges, G.; Ernst, R.; Hoffmann, G.; Keller, H. et al. Auswirkungen von "Tempo 100" auf Verkehrsablauf und Unfallgeschehen. Bundesanstalt für Strassenwesen, Köln, 1975.

Caminada, H. Verkeersanalyse en gegevensverwerking op rijksweg 13. Lab. voor autom. verkeerssystemen. TH-Delft, 1973.

Cowan, R.J. Useful headway models. Transportation Research 9 (1975) 6: 371-375.

Eaton, J.E. & Burrow, I.J. Speeds of cars on motorways in England, 1970 and 1973. TRRL report LR-663. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1974.

Fortuijn, L.G.H. Maatregelen tegen kop-staartbotsingen bij verkeerslichten. Verkeerstechniek 25 (1974) 2: 60-66.

Greenberg, I. The log-normal distribution of headways. Australian Road Research 2 (1966) 7.

HRB. Highway Capacity Manual. Practical Applications of Research. Highway Research Board. Washington, 1950.

HRB. Highway Capacity Manual. Special Report 87. Highway Research Board. Washington, 1965.

Hoeven, W.J. ter & Koster, J. Een apparaat waarmee clustervorming op autowegen gedetecteerd kan worden. Lab. voor autom. verkeerssystemen, TH-Delft, 1971.

Janssen, S.T.M.C. Verkeersveiligheid als criterium voor het wegontwerp. In: Wegontwerp en wegverlichting tegen de achtergrond van de verkeersveiligheid. Preadviezen Congresdag 1974. Vereniging Het Ned. Wegencongres, 's-Gravenhage, 1974.

Klijnhout, J.J. & Jenezon, J.H. Plaatselijke signaleringssystemen. Verkeerstechniek 24 (1973) 7: 338-339.

Krzeminski, R.J. The use of skewed speed distributions to locate points of high accident potential on low volume two-lane rural highways. Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, 1976.

LVV. Volgtijdverdelingen. Lab. voor verkeerstechniek. TH-Delft, 1969.

Lamm, R. & Schlichter, H.G. Geschwindigkeitsverhalten von Fahrzeugkollektiven bei unterschiedlichen Witterungs- und Tageslichtbedingungen. Strassen- und Tiefbau 25 (1971) 12: 873-877.

Latour, P.L. Het verkeer als een Markov-proces. Verkeerstechniek 24 (1973) 2: 72-74.

Lenz, K.H. & Steinhof, H. Beeinflussung des Fahrverhaltens auf Beihilfsfahrstreifen der BAB-Baustellen. Strassenverkehrstechnik 16 (1972) 3: 82-86.

Lenz, K.H. Abstandsverhalten von Kraftfahrzeugfahrern und Möglichkeiten für die Überwachung. Polizei Technik Verkehr 18 (1973) 11: 490-498.

Lenz, K.H. & Steinhoff, H. Ein Ansatz zur Definition von Fahrzeugpulks. Strassenverkehrstechnik 20 (1976) 1: 14-17.

Leutzbach, W.; Siegener, W.; Wiedemann, R. Über den Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen und Verkehrsbelastung auf einem deutschen Autobahnabschnitt. Accident Analysis & Prevention 2 (1970): 93-102.

Lindner, J. A contribution of the statistical analysis of speed distributions. In: Edie, L.C. et al (ed.). Vehicular traffic Science. Elsevier, New York, 1967.

Ludes, K. & Siegener, W. Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten. Institut für Verkehrswesen. TH Karlsruhe, 1969.

May, A.D. Gap availability studies. Highway Research Record 72. Highway Research Board. Washington, 1965.

Miller, A.J. An empirical model for multilane road traffic. *Transportation Science* 4 (1970) 2: 164-168.

Montroll, E.W. Acceleration noise and clustering tendency of vehicular traffic. In: Herman, R. (ed) *Theory of traffic flow*. Proc. Symp. on the theory of traffic flow. Elsevier, Amsterdam, 1961.

Munjal, P.K. & Hsu, Y.S. Characteristics of freeway traffic and of freeway lane-changing behaviour. *Highway Research Record* 453. Highway Research Board, Washington, 1973.

OECD. Speed limits outside built-up areas. *OECD, Parijs*, 1972.

O'Flaherty, C.A. & Coombe, R.D. Speeds on level rural roads: a multivariate approach. *Traffic Engineering & Control* 13 (1971) 3: 20-21, 2: 68-70 en 3: 108-111.

Oppenlander, J.C. Variables influencing spot-speed characteristics. Special Report 89. Highway Research Board. Washington, 1966.

Pagano, A.M. Validation of intermediate criteria on rural horizontal curves. In: Taylor, J.I. et al. *Roadway delineations systems*. N.C.H.R.P. report 130. Highway Research Board. Washington, 1972.

Pahl, J. & Sands, T. Vehicle interaction: criteria from time series measurements. *Transportation Science* 5 (1971) 4: 403-417.

Petigny, B. Le calcul des probabilités et la circulation des véhicules. *Annales des Ponts et Chaussées* 1 (1967) : 3-22.

RTI. Speed and accidents. Volume I Final report. Research Triangle Institute. Durham, 1970.

Schlums, J. & Burkhardt, F. Beobachtung des Verkehrsablaufs auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg vor und nach Aufhebung einer Geschwindigkeitsbeschränkung. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* 45. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1966.

Schlums, J. & Burkhardt, F. Änderung des Fahrverhaltens auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg in den Jahren 1963 bis 1966. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 92. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1969.

Slop, M. Groene trechter in Eindhoven nog experimenteel. Verkeers-  
techniek 17 (1966) 2: 68-73.

Solomon, D. Accidents on main rural highways related to speed, driver and vehicle. U.S. Govt. Printing Office. Washington, 1964.

Storost, R. Die logarithmische Normalverteilung zur Beschreibung von Zeitlückenverteilungen auf Autobahnen. Strassenverkehrstechnik 18 (1974) 2: 43-46.

SWOV. Snelheidslimieten buiten de bebouwde kom. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV. Voorburg, 1971.

Takes, T.E. Opmerkelijke resultaten met groene golf. Verkeerstech-  
niek 15 (1965) 5: 244-245.

Taylor, M.A.P.; Miller, A.J.; Ogden, K.W. A comparison of some bunching models for rural traffic flow. Transportation Research 8 (1974) 1: 1-9.

Tolle, J.E. & Treiterer, J. The distribution of vehicular headways, a stochastic model. In: Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetry techniques. Ohio State University, 1969.

Underwood, R.T. Traffic flow and bunching. Journal of Australian Road Research 2 (1963) June: 8-25.

Wasielowski, P. An integral equation for the semi-poisson headway distribution model. Transportation Science 8 (1974) 3: 237-247.

Weiss, G.H. Letter to the editor. Solution to an integral equation in the study of semi-poisson headway distributions. Transportation Science 8 (1975) 1: 86-87.

White, S.B. & Nelson, A.C. Some effects of measurement errors in estimating involvement rate as a function of deviation from mean traffic speed. J.o. safety research 2 (1970) 2: 67-72.

Wingerd, N.C. Minimum speed limits on freeways. Highway Research Record 244. Highway Research Board. Washington, 1968.

Wolff, A.F. de. Accident rates on motorways, especially with reference to speed differences. In: Proc. Eight international study week in traffic engineering. OTA, London, 1966.

Zackor, H. Beurteilung verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 128. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1972.

APPENDICES

bij

State of the art rapport "Verkeersstroommodellen"

Deel V. Mesoscopische verkeersstroomkenmerken

- A. Terminologie
- B. Definitie cluster en file
- C. Onderzoek van volgtijden en volgafstanden
- D. Onderzoek van snelheden
- E. Onderzoek van combinaties

Ir. H. Botma

Voorburg, december 1977

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

## Appendix A

### TERMINOLOGIE

Op het gebied van verkeersstroomkenmerken bestaat (nog) geen duidelijke en algemene gebruikte terminologie.

Dit is aanleiding geweest de mesoscopische kenmerken volgtijd, volgafstand, file, cluster enz. te vermelden en enigszins te vergelijken, zoals ze voorkomen in:

- a. dit rapport;
- b. de Nederlandse Norm, NNI (1970);
- c. de Amerikaanse Highway Capacity Manual, HRB (1965);
- d. de Britse opsomming Vocabulary of traffic engineering terms, TEC (z.j.);
- e. de Westduitse Begriffsbestimmungen, Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen (1973).

### Volgtijd

- a) De tijd die verloopt tussen het op een bepaald punt (doorsnede van een rijstrook, soms rijbaan) passeren van een voertuig en het volgende voertuig in dezelfde richting; te onderscheiden in:
- bruto volgtijd, heeft betrekking op overeenkomstige punten van de voertuigen
  - netto volgtijd, heeft betrekking op achterkant (in ruime zin, bv. ook laatste as) van voorligger en voorkant van achterligger.

b) Definitie vrijwel gelijk, echter wordt interval genoemd.

c) Headway = bruto volgtijd.

Gap = netto volgtijd of netto volgafstand.

d) Time interval = bruto volgtijd.

e) Bruttozeitlücke (Bruttozeitabstand) = bruto volgtijd.

Nettozeitlücke (Nettozeitabstand) = netto volgtijd.

Folgezeitlücke = bruto volgtijd binnen een Fahrzeugkolonne (zie onder cluster en file).

Opm.: In Nederlandse literatuur komt men ook hiaattijd tegen.



### Volgafstand

- a) De afstand die op een bepaald moment bestaat tussen twee zich achter elkaar bevindende voertuigen (die in dezelfde richting (willen) rijden en meestal betrekking hebbend op een rijstrook). Bruto en netto volgafstand analoog aan volgtijd.
- b) Afstand, volgafstand = netto volgafstand.
- c) Spacing = bruto volgafstand.  
Gap = netto volgafstand of netto volgtijd.
- d) Headway = bruto volgafstand.  
Following distance = netto volgafstand.
- e) Bruttoweglücke (Bruttowegabstand) = bruto volgafstand.  
Nettoweglücke (Nettowegabstand) = netto volgafstand.

### Cluster, file enz.

- a) Een cluster is een aantal voertuigen dat op een rijstrook in dezelfde richting rijdt en waarvan de volgafstanden kleiner en de snelheden groter dan zekere grenswaarden zijn (zie ook Appendix B). Een file is een aantal voertuigen dat op een rijstrook in dezelfde richting rijdt (of wil rijden) en waarvan de volgafstanden en de snelheden kleiner zijn dan zekere grenswaarden.
- b) Tros, cluster = een aantal in een groep rijdende voertuigen, hiertoe gedwongen door beperkte inhaalmogelijkheden.  
File = een aantal achter elkaar rijdende of staande voertuigen, hiertoe gedwongen door de gesteldheid van of de omstandigheden op de weg, dan wel door verkeerstekens of aanwijzingen door verkeersregelaars.  
Verkeersgolf = een groep rijdende voertuigen met geringe onderlinge afstand en/of tussenruimte (= afstand tussen twee zich naast elkaar bevindende voertuigen) en met duidelijk te onderkennen open ruimten voor de kop en achter de staart van de groep, doorgaans t.g.v. verkeerslichten of aanwijzingen door verkeersregelaars.  
Kolonne = een aantal zich achter elkaar bevindende voertuigen onder leiding.  
Bij deze officiële Nederlandse termen ligt de nadruk op de oorzaak

van de diverse verschijnselen, dit is wel illustratief maar biedt weinig houvast bij de operationelisering. Het lijkt erop dat een verkeersgolf een bijzondere tros/cluster is, en die weer een bijzondere file.

c) Platoon = een compacte groep voertuigen, in beweging of daartoe gereed, en met duidelijke vrije ruimtes er voor en er achter. Een "platoon" kan dus zowel een cluster als een file zijn.

d) Bunching = het rijden in duidelijke groepen t.g.v. beperkte inhaalmogelijkheden.

Een "bunch" kan dus ook zowel een cluster als een file zijn.

e) Fahrzeugreihe = twee of meer voertuigen die zich in een rijstrook achter elkaar bevinden.

Dit begrip is zo ruim dat het weinig betekenis lijkt te hebben.

Fahrzeugkolonne = deel van opeenvolgende voertuigen van een "Fahrzeugreihe", waarvan ieder voertuig behalve de voorste in zijn snelheidsgedrag door minstens een voorligger wordt beïnvloed.

Dit komt ongeveer overeen met de termen file en cluster.

#### LITERATUUR

NNI. Nomenclatuur van het verkeer (wegverkeer). Normblad NEN 3391. Nederlands Normalisatie Instituut. Rijswijk, 1970.

HRB. Highway Capacity Manual. Special Report 87. Highway Research Board. Washington, 1965.

TEC. Vocabulary of traffic engineering terms. Traffic Engineering & Control. z.j.

Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen. Begriffsbestimmungen. Strassenplanung und Strassenverkehrstechnik. Köln, 1973.

Appendix B

DEFINITIE CLUSTER EN FILE

De situatie met betrekking tot de begrippen cluster en file, en verder nog platoon, tros, verkeersgolf, is nogal onduidelijk. De Nederlandse norm, zie Appendix A, stelt de oorzaak in de definities centraal. Het volgende is een poging de begrippen cluster en file operationeel te definiëren, d.w.z. zodanig dat ze uit observeerbare verkeersstroomkenmerken zijn af te leiden, terwijl bovendien cluster en file disjunct zullen zijn.

Kwalitatief wordt bij beide termen meestal ongeveer aan het volgende gedacht:

Een cluster is een

- . kleine groep voertuigen op 1 rijstrook met een duidelijke kop en staart;
- . met korte volgafstanden (exclusief leider);
- . hoge snelheden;
- . kleine snelheidsverschillen;
- . temidden van een verkeersstroom met een kleinere dichtheid dan die in het cluster.

Een file is een

- . grote groep voertuigen op 1 rijstrook met een duidelijke kop en staart;
- . met korte volgafstanden (exclusief leider);
- . lage snelheden inclusief stilstand;
- . kleine snelheidsverschillen;
- . temidden van een verkeersstroom met een grote dichtheid.

Het bovenstaande is (ten dele) vertaald in kwantitatieve condities.

	Cluster		File	
	leider	overige	leider	overige
volgtijd	groot	klein	groot	onbepaald
volgafstand	groot	klein	groot	klein
snelheid	groot	groot	klein	klein
snelheidsverschil				
t.o.v. voorligger	onbepaald	klein	onbepaald	klein

Groot en klein zijn bedoeld als groter en kleiner dan nader te bepalen grenswaarden.

Bij vergelijking van de kwantitatieve condities met de kwalitatieve omschrijving blijkt:

- het aantal voertuigen speelt geen rol; dit kenmerk lijkt niet zo essentieel voor de definitie en een grens is moeilijk te kiezen.
- de duidelijke kop en staart ontbreken; dit is inherent aan het kiezen van bepaalde grensvoorwaarden, er zullen altijd waarden zijn die hier weinig van afwijken.
- de dichtheid van de verkeersstroom ontbreekt. Bij keuze van een grens leidt deze conditie tot ongewenste gevolgen; wel wordt verwacht dat meestal aan de kwalitatieve voorwaarde is voldaan.
- de kleine volgafstand en het geringe snelheidsverschil zijn de gemeenschappelijke eigenschappen van cluster en file.
- het verschil tussen cluster en file zit in de snelheid.

#### Grenswaarde snelheid.

Een geschikte waarde hiervoor lijkt de gemiddelde snelheid die optreedt als de intensiteit de capaciteit bereikt. Hiermee wordt bereikt dat clusters meestal optreden in verkeer met kleine dichtheid en files in verkeer met grote dichtheid.

#### Grenswaarde volgafstand.

Een algemene keuze hiervoor is moeilijk aan te geven en zal ook afhankelijk kunnen zijn van het doel waarmee men clusters en files beschouwt.

Voor clusters kan men in plaats van voor de volgafstand ook een grenswaarde voor de volgtijd kiezen, wat meer gebruikelijk is omdat men meestal over locale observaties beschikt. De grenswaarde kan zo gekozen worden dat er binnen clusters bv. een (duidelijke) invloed van voor- op achterlijger bestaat of een potentieel onveilig gedrag optreedt. In het laatste geval zal de grenswaarde ongetwijfeld kleiner zijn dan in het eerste.

Bij files is een grenswaarde van de volgtijd niet bruikbaar in verband met de lage snelheden die kunnen optreden. Een om een of andere

reden te prefereren grenswaarde voor de volgafstand, eventueel nog snelheidsafhankelijk, is niet bekend.

#### Grenswaarde snelheidsverschil.

Een duidelijk principe volgens welke de grens gekozen moet worden ontbreekt. Vooral bij files zal men rekening moeten houden met afremmen en optrekken, waardoor van nature al snelheidsverschillen ontstaan en toch de file blijft bestaan.

#### Bezwaren.

Aan de gekozen definities kleven de volgende bezwaren:

- . Er kunnen korte files voorkomen vanaf twee voertuigen.
- . Er kunnen files (vooral korte) voorkomen bij hoog afwikkelingsniveau (bv. op een autosnelweg rijden bij afwikkelingsniveau A twee auto's met 50 km/h op korte afstand).
- . Afhankelijk van de gekozen grenswaarden kunnen zeer lange clusters optreden, bv. bij afwikkelingsniveau E.

Deze eerste drie bezwaren betreffen dus afwijkingen tussen de kwalitatieve begrippen en mogelijke, vermoedelijk uitzonderlijke, consequenties van de definities.

- . Bij een complete groep voertuigen die van de ene naar de andere geregelde kruising rijdt en steeds tot stilstand komt (het begrip verkeersgolf uit de Nederlandse norm, zie Appendix A) zou bij toepassing van het bovenstaande deze groep afwisselend file en cluster zijn, zonder dat dit nu zo essentieel lijkt. Hieruit blijkt dat de definities wellicht slechts bruikbaar zijn bij "niet onderbroken" verkeersstromen. Het laatste begrip is afkomstig uit de Highway Capacity Manual en betekent dat voertuigen in dergelijke verkeersstromen niet hoeven te stoppen t.g.v. voor de stroom externe oorzaken.

Appendix C

ONDERZOEK VAN VOLGTIJDEN EN VOLGAFSTANDEN

Breiman et al (1969).

Bij de analyse van gemeten volgtijden wordt er meestal impliciet van uitgegaan dat deze opgevat kunnen worden als onafhankelijke trekkingen uit een verdeling en dat het beschouwen van een bepaalde intensiteitsklasse stationairiteit tot gevolg heeft. Breiman onderzocht de eerste veronderstelling voor perioden die enige stationairiteitstoetsen hadden doorstaan. De volgtijden waren afkomstig van de rechter en middelste strook van een 3-strooksrijbaan van een Amerikaanse autosnelweg bij intensiteiten van resp. 600-1750 en 950-2050 vtg/h, waarbij geen congestie optrad. Van de acht gevallen bleek er slechts bij een, bij drie verschillende toetsen, een significante maar zwakke afhankelijkheid (correlatie van twee opeenvolgende volgtijden ca. 0,1) op te treden en wel op de middelste strook bij ca. 1000 vtg/h. De voorlopige conclusie was dat volgtijden op autosnelwegen onafhankelijk zijn.

Brühning (1973).

Onderzocht zijn de volgtijden van voertuigen in afhankelijkheid van hun maximaal mogelijke snelheid (80-190 km/h) in de volgende conditie: vlakke autosnelweg, werkdag, daglicht, rijbaanintensiteit (2 stroken) ca. 2000 vtg/h. Het bleek dat met toenemende "topsnelheid" de fractie voertuigen met een korte volgtijd (gedefinieerd als kleiner dan 1 en 1,8 seconde) toenam.

Caminada (1973).

Bij de analyse van volgtijden, gemeten op RW 13, werden de percentielen 10, 50 en 90 en de modus per rijstrook als functie van de intensiteit beschouwd. Het algemene beeld was overeenkomstig de Highway Capacity Manual, d.w.z. naarmate de intensiteit toenam werd  $p(\tau)$  smaller, voornamelijk door daling van de hogere percentielen. Gegeven de intensiteit werd  $p(\tau)$  breder bij een meer naar links gelegen rijstrook. De modus bleef vanaf ca. 800 vtg/h

constant op 1 s.

Op dezelfde wijze, als in het volgende bij LVV (1969) beschreven zal worden, werd de capaciteit geschat, met als resultaat voor de middelste rijstrook 1870 vtg/h en voor de linker 1800-2300 vtg/h. De bepaling van de modus was voor deze toepassing echter eigenlijk te grof.

Cowan (1975).

Onderzocht is de eventuele afhankelijkheid van volgtijden op een enkelbaans-tweestrooksweg in een situatie die twee uur lang stationair was. De intensiteit in de beschouwde richting was 700 vtg/h en de tegenstroom ca. 300 vtg/h. Het bleek dat opeenvolgende volgtijden onafhankelijk waren. De analysemethode was dezelfde als gebruikt door Breiman et al (1969).

Dawson (1969).

Onderzocht is in hoeverre een combinatie van een verschoven exponentiële en een verschoven Erlang verdeling geschikt is de volgtijden op een enkelbaans-tweestrooksweg te representeren bij diverse intensiteiten. Dit voor twee verzamelingen data, waarvan een uit de Highway Capacity Manual. In beide gevallen paste de gekozen verdeling goed; binnen de verzamelingen waren de parameterwaarden redelijk consistent maar er tussen traden grote verschillen op. Voor interpretatie van het laatste ontbreken gegevens, bovendien wordt niet ingegaan op de kwaliteit van de ondoorzichtige schattingsmethode.

Erlander (1971).

Als onderdeel van een toetsing van een verkeersstroommodel voor een enkelbaans-tweestrooksweg zijn o.a. volgtijden geanalyseerd. De rijbaanintensiteit was 300 tot 400 vtg/h, vrijwel constant, en bestond voor ca. 20% uit vrachtverkeer. Het bleek dat de exponentiële verdeling goed paste.

Opm.: Hieruit volgt niet dat deze verdeling realistisch is voor zeer korte volgtijden, echter in dit concrete geval dat de fractie volgtijden tussen 0 en 10 s er goed door voorspeld werd.

Greenberg (1966).

Geconstateerd wordt dat de lognormale verdeling goed past voor twee verzamelingen volgtijden. De eerste was afkomstig van een rijstrook van een Amerikaanse autosnelweg bij een intensiteit van ca. 2000 vtg/h, de tweede uit de Holland-tunnel, waarbij alleen voertuigen met een snelheid van 48-54 km/h en een volgafstand van minder dan 60 m beschouwd werden. In het laatste geval gold, omdat de snelheid vrijwel constant was, dat de lognormale verdeling ook de volgafstanden goed beschreef.

HRB (1965).

Gepresenteerd worden volgtijdverdelingen bij diverse intensiteiten voor rurale 2- en 4-strookswegen. Het blijkt dat ca. 2/3 van de voertuigen een volgtijd kleiner dan de gemiddelde heeft. Voor een 3-strooksrijbaan van een autosnelweg wordt per strook de kansdichtheid als functie van de intensiteit gegeven. Naarmate de intensiteit toeneemt wordt de dichtheid duidelijker ééntoppig, de lage percentielen, bv. 15%, dalen daarbij veel minder dan de hoge. Steeds geldt dat de modus (waarde waarbij de kansdichtheid maximaal is) kleiner is dan de mediaan (50 percentiel) en die weer kleiner dan het gemiddelde. Over de mathematische verdelingen wordt gesteld dat bij een intensiteit van 500 vtg/h en richting de exponentiële verdeling nog wel voldoet voor een 4-strooks- maar niet voor een 2-strooksweg. Als alternatieven worden de verschoven exponentiële en de combinatie van twee van dergelijke verdelingen genoemd; de laatste is gebruikt op 2-strooks stadswegen.

LVV (1969).

Op twee 4-strooks Nederlandse autosnelwegen (RW 2 en RW 4) zijn volgtijden gemeten, apart voor linker- en rechterrijstrook en is de afhankelijkheid van de intensiteit beschouwd van de percentielen 7, 16, 50 en 84. De resultaten van beide wegen waren vrijwel gelijk, terwijl op RW 4 een maximumsnelheid gold van 110 km/h en op RW 2 geen limiet. De modus van de kansdichtheid bleef vanaf een intensiteit van ca. 1000 vtg/h constant op ca. 1 s. Uit het verloop van de percentielen, dat globaal hetzelfde was als in de Highway Capa-



city Manual, wordt geconcludeerd dat als de capaciteit bereikt wordt de volgtijden nog duidelijk verschillend zullen zijn. Uit het laatste wordt een capaciteitsschatting afgeleid via een relatie die geldt voor ééntoppige kansdichtheden van matige scheefheid, nl. gemiddelde minus modus is gelijk aan 3 maal (gemiddelde minus mediaan); zie Kendall & Stuart (1963). Het resultaat was voor de linkerrijstrook van RW 4 een capaciteit van 1950 vtg/h. Gegeven de intensiteit was  $p$  ( $\tau$ ) breder op de linkerrijstrook.

May (1965).

Onderzocht is de volgtijdverdeling op de rechterrijstrook van Amerikaanse autosnelwegen, even bovenstrooms van een toerit, voor en in de middagspits, met het doel gegevens te verzamelen voor toeritregelingen. De intensiteit varieerde van 600 tot 1800 vtg/h en de bezettingsgraad in tijd van 10 tot 30%. Het bleek dat de verdelingen bij de diverse intensiteits- en bezettingsgraadklassen significant verschilden; voor de intensiteit was dat ook te verwachten omdat die de gemiddelde volgtijd bepaalt maar dit bleek niet op te gaan voor de bezettingsgraad. Gegeven de intensiteit of de bezettingsgraad was er ook meestal een significant verschil tussen de drie plaatsen waar gemeten was.

Onderzoek van wiskundige verdelingen leverde op dat de al of niet verschoven exponentiële duidelijk niet paste, een combinatie van een normale en verschoven exponentiële paste veel beter maar was niet bestand tegen een chi-kwadraat toets, terwijl tenslotte de lognormale verdeling ook redelijk paste, wat echter alleen met grafieken werd vastgesteld. Het is jammer dat de grote hoeveelheid data niet wat beter, in statistische zin, verwerkt is; zo worden de diverse parameters nogal primitief geschat.

Miller (1970).

In deze publikatie wordt verwezen naar een eerder uitgevoerde analyse van volgtijden op een enkelbaans tweestrooksweg. Hierbij was een sterke afhankelijkheid gevonden, nl. een eerste autocorrelatiecoëfficiënt van 0,55; een intensiteit wordt niet genoemd.

Opm.: Dit resultaat is van beperkte waarde omdat van de analyse geen details beschikbaar zijn. Bij onzorgvuldige analyse kan men gemakkelijk schijnafhankelijkheden vinden, bv. indien de tijdreeks niet stationair is.

Munjal & Hsu (1973).

Observatie van verkeersstromen op een aantal autosnelwegen, met een luchtfotomethode bij diverse afwikkelingsniveau's, heeft opgeleverd dat zowel opeenvolgende volgtijden als volgafstanden onafhankelijk zijn.

Storost (1974).

Geanalyseerd zijn volgtijden van Westduitse autosnelwegen. Alleen de lognormale verdeling werd onderzocht en paste vrij goed. De parameter  $\sigma$  bleek tot een intensiteit van 900 vtg/h vrijwel constant te zijn. Bij gegeven intensiteit was  $\sigma$  op de linkerstrook groter dan rechts, d.w.z. op de linkerstrook kwamen relatief meer korte volgtijden voor. Bij grotere intensiteiten werd  $\sigma$  kleiner en gingen de verdelingen op beide stroken minder verschillen. Ook weinig verschil was er stroomopwaarts van een afrit als de uitvoegers reeds op de uitvoegstrook reden. Voor toepassing wordt gedacht aan simulatie en aan het bepalen van de capaciteit van wegvakken met toe- en afritten, weefvakken e.d. (N.B.  $\sigma$  is hier niet de standaardafwijking).

Tolle & Treiterer (1969).

Geconcludeerd wordt dat van een aantal verdelingen een verschoven lognormale het beste paste voor de volgtijden op een rijstrook van een autosnelweg, bij intensiteiten van 800-1900 vtg/h. Er heeft echter geen objectieve vergelijking plaats gevonden van de diverse verdelingen.

Potentiële toepassingen zijn simulatie en ontwerp van een toeritregeling met individuele geleiding.

Wasielowski (1974).

Uitgangspunt is dat vanaf een bepaalde waarde de volgtijdverde-

ling vrijwel exponentieel is, wat experimenteel al vaak gevonden is, maar dat voor het gebied van kleine volgtijden beter nog geen specifieke verdeling gekozen kan worden. De parameter-vrije verdeling voor het gebonden verkeer volgt, na het aanpassen van de staart, uit een integraalvergelijking die numeriek opgelost moet worden. In een later commentaar merkt Weiss (1975) op dat de oplossing ook in gesloten vorm te vinden is, waarbij het numerieke werk beperkt kan blijven tot het oplossen van een transcendente vergelijking. De methode is uitvoerbaar gebleken voor gemeten volgtijden op Amerikaanse en Britse autosnelwegen. Toepassing van deze methode op grotere schaal zou tot een minder willekeurige keuze van een mathematische verdeling voor het gebonden verkeer kunnen leiden. Voorlopig is het resultaat gebruikt om de capaciteit te schatten in de veronderstelling dat alle voertuigen dan gebonden rijden en de verdeling hetzelfde blijft. De schattingen vallen nogal hoog uit, 2200 en 2500 vtg/h, en opgemerkt wordt dan ook dat het onbekend is of de gebonden volgtijdverdeling wel gelijk blijft en zo ja of de verkeersstroom dan nog stabiel is.

Zackor (1972).

Onder invloed van verplichte maximumsnelheden, die bij grote verkeersdrukten werden ingeschakeld, daalde op een Westduitse autosnelweg de fractie volgtijden kleiner dan 1 seconde.

#### LITERATUUR

Breiman, L.; Gafarian, R.; Lichtenstein, R.; Murthy, V.K. An experimental analysis of single-lane time headways in freely flowing traffic. In: Leutzbach, W. & Baron, P. (ed.). Beitrage zur theorie des Verkehrsflusses. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 86. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1969.

Brühning, E. Zum Verkehrsverhalten in Abhängigkeit vom gefahrenen Fahrzeugtyp. Polizei, Strassenverkehrstechnik 17 (1973) 3: 85-90.

Caminada, H. Verkeersanalyse en gegevensverwerking op rijksweg 13. Lab. voor autom. verkeerssystemen. TH-Delft, 1973.

Cowan, R.J. Useful headway models. Transportation Research 9 (1975) 6: 371-375.

Dawson, R.F. The hyperlang probability distributions; a generalized traffic headway model. In: Leutzbach, W. & Baron, P. (ed.). Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 86. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1969.

Erlander, S. A mathematical model for traffic on a two-lane road with some empirical results. Transportation Research 5 (1971) 2: 135-175.

Greenberg, I. The log-normal distribution of headways. Australian Road Research 2 (1966) 7.

HRB. Highway Capacity Manual. Special Report 87. Highway Research Board. Washington, 1965.

Kendall, H.G. & Stuart, A. The advanced theory of statistics. Deel I. Hoofdstuk 2. Griffin, London, 1967.

LVV. Volgtijdverdelingen. Lab. voor verkeerstechniek. TH-Delft, 1969.

May, A.D. Gap availability studies. Highway Research Record 72. Highway Research Board. Washington, 1965.

Miller, A.J. An empirical model for multilane road traffic. Transportation Science 4 (1970) 2: 164-168.

Munjal, P.K. & Hsu, Y.S. Characteristics of freeway traffic and of freeway lane-changing behaviour. Highway Research Record 453. Highway Research Board. Washington, 1973.

Storost, R. Die logarithmische Normalverteilung zur Beschreibung von Zeitlückenverteilungen auf Autobahnen. Strassenverkehrstechnik 18 (1974) 2: 43-46.

Tolle, J.E. & Treiterer, J. The distribution of vehicular headways, a stochastic model. In: Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetry techniques. Ohio State University (1969).

Wasielewski, P. An integral equation for the semi-poisson headway distribution model Transportation Science 8 (1974) 3: 237-247.

Weiss, G.H. Letter to the editor. Solution to an integral equation in the study of semi-poisson headway distributions. Transportation Science 8 (1975) 1: 86-87.

Zackor, H. Beurteilung verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 128. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1972.

Appendix D

ONDERZOEK VAN SNELHEDEN

Brühning (1973).

Onderzocht zijn de gereden snelheden van voertuigen in afhankelijkheid van hun maximaal mogelijke snelheid (80-190 km/u) in de volgende conditie: vlakke autosnelweg, werkdag, rijbaanintensiteit (2 stroken) ca. 2000 vtg/h, daglicht. Het bleek dat de gereden snelheid toenam met toenemende mogelijke snelheid tot aan ca. 150 km/h en daarna niet meer.

Eaton (1974).

Vergeleken zijn de snelheden op Britse autosnelwegen in 1970 en 1973, bij intensiteiten die geacht werden de snelheden niet te beïnvloeden, op werkdagen bij goede weersomstandigheden. Met een moving observer methode werden gemiddelde en st.afw. van de snelheden van personenauto's over een aantal trajecten bepaald. Het bleek dat de gemiddelde snelheid was gestegen van 63 tot 65½ mph (ca. 99 tot 105 km/h) en de st.afw. was gedaald van 10½ tot 9 mph (ca. 17 tot 14½ km/h). De fractie voertuigen met een snelheid groter dan de snelheidslimiet van 70 mph (ca. 110 km/h) was gestegen van 25 tot 30%. In het verleden had deze snelheidslimiet, die eind 1965 was ingesteld, de bestaande stijgende trend 3 à 4 jaar onderbroken. In het bovenstaande heeft de "energiecrisis" van eind 1973 nog geen invloed gehad.

HRB (1965).

Er wordt slechts globale informatie over snelheden gegeven. Naast de bekende stijgende trend in de tijd, ca. 10 mijl/h van '46 tot '64, wordt gesteld dat veel factoren invloed hebben op de snelheden. Hiervan is blijkbaar weinig bekend, behalve het effect van het ontwikkelingsniveau op de verdeling, onder ideale omstandigheden, op diverse wegtypen buiten de bebouwde kom. Behalve dat bij toenemende intensiteit het gemiddelde afneemt daalt ook de standaardafwijking en bereikt de kleinste waarde op enkelbaans-tweestrookswegen, te verklaren met de geringe manoeuvrekeuze die daar bij hoge intensiteit nog resteert.

Lamm & Schlichter (1971).

Onderzocht is het type snelheidsverdeling en het effect van weerscondities (nat en droog) en dag versus nacht op een lichte en zwaar belaste autosnelweg en op een rurale enkelbaans twee- strooksweg met diverse boogstralen. Helaas is de presentatie van de resultaten nogal summier. Het bleek dat in alle gevallen de hypothese, dat de snelheden normaal verdeeld zijn, niet verworpen werd. Bij nat wegdek daalden de snelheden over het gehele gebied, in het algemeen de hoge snelheden het meest, waarbij echter toch een groot deel van de snelheden boven de ontwerpnelheid bleef. Bij nacht waren de snelheden (in tegenstelling tot wat Schlums vond) op de autosnelweg wat hoger, op het rechte gedeelte van de enkelbaansweg lager, echter bij een kleine boogstraal gelijk of hoger. Het laatste wordt toegeschreven aan een betere observeerbaarheid van de tegenliggers.

Munjal & Hsu (1973).

Geobserveerd werden verkeersstromen op een aantal autosnelwegen met een luchtfotomethode (ca. 1 mijl weglengte) zodat locale en momentane grootheden geanalyseerd konden worden. Dit is gebeurd voor een aantal perioden van enige minuten waarbinnen het afwikkelingsniveau constant was. Zowel de locale als momentane snelheden bleken vrijwel normaal verdeeld te zijn. In theorie is dat als gevolg van de in par. 2.3 genoemde relatie niet mogelijk, echter als de standaardafwijking gedeeld door het gemiddelde klein is ( $< 0,1$ ) blijkt de benadering vrij goed te zijn. Opeenvolgende snelheden, lokaal en momentaan, waren sterk afhankelijk, maar dit feit is niet verder uitgewerkt.

OECD (1972).

In de periode van ca. 1955 tot ca. 1970 blijken in vele landen de snelheden op rurale tweestrookswegen te zijn toegenomen; orde van grootte 1,5 km/h per jaar. Deze stijging wordt voornamelijk aan veranderde voertuigkenmerken toegeschreven.

O'Flaherty & Coombe (1971).

Onderzocht werd het effect van 49 factoren op gemiddelde, stan-

daardafwijking, 85 en 95 percentiel van de snelheidsverdeling en wel op rurale vlakke enkelbaans tweestrookswegen bij relatief weinig verkeer (in beschouwde en tegengestelde richting varieerde de intensiteit van 50 tot 400 vtg/h en strook). Binnen de verkeersstroom dan nog apart voor alle voertuigen, alle personenauto's, alle "vrije" voertuigen, alle "vrije" personenauto's. Hierbij reed een voertuig vrij als de volgtijd groter was dan 3 s of de snelheid minstens 5 mijl/h lager dan die van de voorligger en het niet bezig was met een inhaalmanoeuvre. De analyse is uitgevoerd met multipele lineaire regressie en factoranalyse, wat tot globaal overeenstemmende resultaten leidde, maar de eerste techniek het beste voldeed. Het bleek dat één factor, nl. de boogstraal (120 m tot oneindig) veruit de belangrijkste was (multipele correlatiecoëfficiënt ca. 0,9) en dat daarnaast verkeerssamenstelling, fractie vrije voertuigen en intensiteit hier slechts weinig aan toe konden voegen. Bepaald geen effect hadden geslacht bestuurder, kruising met wegen van lagere categorie, aanwezigheid van stoepranden (kerbs) en weerscondities van helder tot bewolkt. Bij de analyse werd (zonder controle?) verondersteld dat de snelheden normaal verdeeld waren.

#### Oppenlander (1966).

In een literatuurstudie wordt een overzicht gegeven van wat er bekend is betreffende het effect van diverse factoren op locale snelheden. Vijf groepen factoren worden onderscheiden:

- . bestuurderskenmerken; van belang is de ritafstand, niet de bezettingsgraad van het voertuig, noch geslacht, noch leeftijd van de bestuurder;
- . voertuigkenmerken; van belang is het type, binnen de categorie vrachtauto's nog het gewicht, de ouderdom van het voertuig;
- . wegkenmerken; van belang is het type en daar binnen horizontaal en verticaal profiel, soort wegdek, enigszins van belang zijn regio, zichtafstand, rijstrook, obstakelvrije zone en aantal kruisingen;
- . verkeerskenmerken; vooral dichtheid en intensiteit, daarnaast percentage vrachtverkeer, aantallen inhaalmanoeuvres en tegenliggers;



. omstandigheden; weerscondities, tijd (seizoen, maand, dag, uur), meetmethode (meten met zichtbare slangen op de weg verlaagt de snelheden in onbekende mate).

Het bovenstaande is min of meer het gemeenschappelijke dat uit de vele beschouwd, en soms tot strijdige resultaten voerende, onderzoeken naar voren komt. Zo is bijvoorbeeld over het effect van snelheidslimieten geen overeenstemming. Verder moet opgemerkt worden dat sommige factoren onderling nogal sterk zullen samenhangen (zichtafstand met profiel, aantal inhaalmanoeuvres met intensiteit) en moeilijk zijn te scheiden, terwijl bij de meeste onderzoeken slechts enkele in beschouwing zijn genomen.

Pahl & Sands (1971).

Een verkeersstroom werd lokaal geobserveerd op een **tweestrooks-**rijbaan voor één richting. Met de door Breiman & Lawrence (1973) aangegeven methode werden stationaire perioden in de intensiteit bepaald. Bij analyse van de snelheden bleken deze normaal verdeeld te zijn en twee opeenvolgende snelheden afhankelijk. Dat laatste werd aangetoond door vergelijking van de verdeling van de opgetreden snelheidsverschillen en de gesimuleerde, die ontstonden door onafhankelijke lotingen uit de geobserveerde snelheidsverdeling.

Schlums & Burkhardt (1966).

Bij onderzoek van de kansdichtheid op een autosnelweg is geconcludeerd dat deze op de linkerstrook wel ongeveer normaal is, terwijl op de **rechterstrook tot aan een bepaalde intensiteit** tweetoppigheid optreedt. Dit bleek niet veroorzaakt te worden door verschillende snelheden van vracht- en personenauto's, maar door het uiteenvallen van de laatste in twee groepen. 's Nachts waren de gemiddelde snelheden vergeleken met overdag voor de rijbaan ca. 3 km/h lager en voor de rechterstrook ca. 5 km/h.

Schlums & Burkhardt (1969).

Onderzocht is de snelheidsverdeling op een autosnelweg, d.w.z. gemiddelde en standaardafwijking ( $\sigma$ ), met name het effect van een

maximum snelheid, het percentage vrachtverkeer (10-20 en 20-30%), de rijstrook, het type voertuig en dit alles als functie van de rijbaanintensiteit (1200-2000 vtg/h). De belangrijkste resultaten met betrekking tot  $\nabla$  waren:

- . Voor de totale rijbaan is  $\nabla$  14 tot 21 km/h, met maximumsnelheid kleiner, en daalt  $\nabla$  slechts weinig met toenemende intensiteit bij weinig vrachtverkeer en in het geheel niet bij veel.
- . Op de rechterstrook is  $\nabla$  groter (14-18) dan op de linker (10-17).
- . Op de rechterstrook is  $\nabla$  van de personenauto's groter, 15 km/h, dan van het vrachtverkeer, ca. 10 km/h.

Dit alles bij dag, goede omstandigheden en gemiddelde snelheden op rechter- en linkerstrook van resp. 80-90 en 90-100 km/h.

#### Wolff (1966).

In een Nederlands onderzoek zijn gemiddelde snelheid en st.afw. van twee typen autosnelweg vergeleken, een moderner type met ruimer profiel en vlakker wegdek met een verouderd type. Het bleek dat op de modernere uitvoering de gemiddelde snelheid ca. 7 km/h hoger was, de st.afw. 2 à 4 km/h groter en dat beide met toenemende intensiteit minder sterk daalden dan op de oude uitvoering.

#### Zackor (1972).

Onderzocht is het effect van verplichte maximum snelheden, die bij grote drukte op een Westduitse autosnelweg worden ingeschakeld, op locale snelheden. Het bleek dat de st.afw. van de snelheden met limiet op een lager niveau lag en minder dichtheidsafhankelijk was, hetzelfde gold voor het gemiddelde van de absolute snelheidsverschillen tussen twee opeenvolgende voertuigen.

#### LITERATUUR

Brühning, E. Zum Verkehrsverhalten in Abhängigkeit vom gefajremem Fahrzeugtyp. Strassenverkehrstechnik 17 (1973) 3: 85-90.

Eaton, J.E. & Burrow, I.J. Speeds of cars on motorways in England, 1970 and 1973. TRRL report LR-663. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1974.

HRB. Highway Capacity Manual. Special Report 87. Highway Research Board. Washington, 1965.

Lamm, R. & Schlichter, H.G. Geschwindigkeitsverhalten von Fahrzeugkollektiven bei unterschiedlichen Witterungs- und Tageslichtbedingungen. Strassen- und Tiefbau 25 (1971) 12: 873-877.

Munjal, P.K. & Hsu, Y.S. Characteristics of freeway traffic and of freeway lane-changing behaviour. Highway Research Record 453. Highway Research Board. Washington, 1973.

OECD. Speed limits outside built-up areas. **OECD, Parijs**, 1972.

O'Flaherty, C.A. & Coombe, R.D. Speeds on level rural roads: a multivariate approach. Traffic Engineering & Control 13 (1971) 3: 20-21, 2: 68-70 en 3: 108-111.

Oppenlander, J.C. Variables influencing spot-speed characteristics. Special Report 89. Highway Research Board. Washington, 1966.

Pahl, J. & Sands, T. Vehicle interaction criteria from time series measurements. Transportation Science 5 (1971) 4: 403-417.

Schlums, J. & Burkhardt, F. Beobachtung des Verkehrsablaufs auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg vor und nach Aufhebung einer Geschwindigkeitsbeschränkung. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 45. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1966.

Schlums, J. & Burkhardt, F. Änderung des Fahrverhaltens auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg in den Jahren 1963 bis 1966. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 92. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1969.

Wolff, A.F. de. Accident rates on motorways, especially with reference to speed differences. In: Proc. Eight international study week in traffic engineering. OTA, London, 1966.

Zackor, H. Beurteilung verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 128. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1972.

Appendix E

ONDERZOEK VAN COMBINATIES

Athol (1965).

Geanalyseerd zijn locale metingen op een drukke autosnelweg. De grenswaarde van de volgtijd werd zo gekozen dat de fractie voertuigen die in clusters reed vrijwel lineair met de intensiteit toenam en bleek 2,1 s te zijn. Van de resultaten lijkt vooral van belang dat de volgtijden binnen het cluster onafhankelijk van de lengte van het cluster en per voertuig beschouwd onafhankelijk van het rangnummer waren.

Burkhardt (1966).

Een uitvoerige methode is opgesteld ter beoordeling van het volgen in termen van veiligheid uitgaande van locale observaties aan een verkeersstroom op een autosnelweg, m.n. van volgtijden, snelheden en voertuigtype. Bij het vaststellen van de criteria worden de diverse veronderstellingen zo gekozen dat bij overschrijding vrijwel zeker een kop-staart**botsing optreedt als de voorligger van** het beschouwde tweetal plotseling met maximale vertraging afremt tot stilstand. Of zo inderdaad een goede voorspeller is gevonden voor het werkelijk aantal optredende kop-staart**botsingen kan al-**leen door empirisch onderzoek van beide variabelen blijken. Het aantal "gevaarlijke volgers" is volgens bovenstaande methode bepaald op een autosnelweg met en zonder snelheidslimiet van 100 km/h, apart voor linker- en rechterstrook en gerelateerd aan de intensiteit.

Het absoluut aantal onveilige volgers nam op de linkerrijstrook toe en bleef op de rechter gelijk bij toenemende rijbaanintensiteit. Het relatieve aantal op de linkerrijstrook, zowel betrokken op rijbaan- als betreffende strookintensiteit, was met snelheidslimiet constant en nam zonder snelheidslimiet toe met de intensiteit vanaf een rijbaanintensiteit van ca. 1300 vtg/h.

Caminada (1973).

Bij analyse van locale gegevens van de verkeersstroom, op de Neder-

landse autosnelweg RW 13, is de afhankelijkheid van de locale snelheden onderzocht volgens de in par. 2.4 behandelde methode. Het bleek dat voor volgtijden kleiner dan 4 à 5 s de absolute snelheidsverschillen afnamen met dalende volgtijd. Gegeven de volgtijd waren de snelheidsverschillen op de rechterrijstrook van de 3-strooksrijbaan het kleinst.

Ter Hoeven & Koster (1971).

Bij de methode die Burkhardt gebruikt heeft worden steeds tweetallen voertuigen beschouwd. Ter Hoeven heeft op min of meer dezelfde wijze geanalyseerd of binnen een cluster voertuigen de volgfstanden voldoende groot zijn. Verondersteld wordt dat de leider van het cluster gaat remmen met een zekere, niet noodzakelijk maximale, remvertraging tot aan stilstand. Het tweede voertuig van het cluster reageert na een responsietijd. Onderzocht wordt of er tijdens de responsietijd al een botsing optreedt. Zo niet dan wordt berekend welke remvertraging het voertuig nodig heeft om juist niet te botsen, dus de minimaal benodigde. Is deze beschikbaar dan wordt hij ook gebruikt en vervolgens wordt de berekening uitgevoerd voor het volgende voertuig van het cluster. Als binnen een cluster een voertuig botst, benodigde remvertraging groter dan beschikbare, wordt aangenomen dat ook de daarna komende voertuigen van het cluster zullen botsen. Deze methode is nog niet toegepast.

Montroll (1961).

Nagegaan wordt hoe de gemiddelde clusterlengte afhangt van de dichtheid op een rijstrook van een tunnel waarbij strookwisselen verboden is. Hierbij wordt een cluster gedefinieerd door de volgfstanden met een grenswaarde van 30 m, wat bij de optredende snelheden van ca. 40 km/h correspondeert met een volgtijd van ca. 2,7 s. Het bleek dat vanaf ca. 30 vtg/km de gemiddelde clusterlengte sterk toenam en er bij ca. 45 vtg/km in feite sprake was van één lang cluster.

Pahl & Sands (1971).

Bij dit in Appendix D reeds genoemde onderzoek was gevonden dat opeenvolgende snelheden afhankelijk waren. Vervolgens is onder-

zoekt in hoeverre de volgtijd hierbij een rol speelt. Gebleken is, dat de snelheidsverdeling niet van de volgtijd afhangt, echter de verdeling van de snelheidsverschillen voor volgtijden kleiner dan een zekere grenswaarde wel. Dat betekent dat onder de grenswaarde, die nog afhankelijk is van rijstrook en intensiteit, ook de snelheden afhankelijk zijn. Een gebruikelijke presentatie van dit resultaat is een grafiek van het gemiddelde absolute snelheidsverschil als functie van de volgtijd, waarin soms duidelijk een grenswaarde is te zien.

Schlums & Burkhardt (1966),

Geanalyseerd zijn locale metingen van een Westduitse autosnelweg, waarbij als grenswaarde voor de volgtijd 3,5 s is gekozen. De logaritme van de gemiddelde clusterlengte bleek ongeveer lineair met de rijbaanintensiteit (700-2400 vtg/h) toe te nemen. Effect van het percentage vrachtverkeer op de clusterlengte bleek niet aantoonbaar. Het effect van een maximumsnelheid was dat op de linker- en rechterstrook de clusterlengtes respectievelijk af- en toenamen, echter voor de rijbaan als geheel duidelijk afnamen.

Schlums & Burkhardt (1969).

In dit onderzoek zijn locale metingen op een autosnelweg, verricht in 4 opeenvolgende jaren, volgens de "methode Burkhardt" geanalyseerd voor wat betreft het volgen. Hierbij werden de conclusies van Burkhardt (1966) bevestigd en bleek tevens dat het aantal gevaarlijke volgers (bij dezelfde intensiteit): globaal constant in de tijd was, op de linkerstrook ca. 4 maal zo veelvuldig voorkwam, niet afhing van de fractie vrachtverkeer en bij duisternis 20 à 25% lager was.

Taylor (1974).

Onderzocht is welke mathematische kansdichtheid het beste de clusterlengten beschrijft. Dit bleek een zogenaamde Miller dichtheid met twee parameters te zijn. Wat ontbreekt is een relatie tussen de parameters en andere verkeersstroomgrootheden, terwijl bovendien de data afkomstig zijn uit diverse landen waarbij verschillende clusterdefinities zijn gebruikt.

Underwood (1963).

Geanalyseerd zijn locale metingen op diverse wegen. De grenswaarde voor de volgtijd wordt gekozen volgens het in par. 2.4 beschreven principe en blijkt steeds ca. 5 s te zijn. Op een tweestrooksweg in de drukste richting met een geringe en vrijwel constante stroom tegenliggers, bleken bij de clusterlengten als functie van de intensiteit het gemiddelde en de standaardafwijking toe te nemen en de variatiecoëfficiënt een maximum te vertonen. De gemiddelde snelheid van de voertuigen van het cluster en die van de leider namen af met toenemende clusterlengte en verder bereikte de volgtijd binnen de clusters een minimale waarde van ca.  $1\frac{1}{2}$  s bij het 10e à 15e voertuig. Op een 2-strooksrijbaan voor een richting nam, zoals te verwachten, ook de gemiddelde clusterlengte toe met de intensiteit. Gegeven de strookintensiteit waren de clusters rechts korter en gegeven de rijbaanintensiteit waren de clusters rechts langer tot ca. 1600 vtg/h en daarna korter. Dit laatste is te verklaren met de verdeling van de rijbaanintensiteit over de stroken.

LITERATUUR

Athol, P. Headway groupings. Highway Research Record 72. Highway Research Board. Washington, 1965.

Burkhardt, F. Beurteilung der Kraftfahrzeugabstände auf Bundesautobahnen. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 46. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1966.

Caminada, H. Verkeersanalyse en gegevensverwerking op rijksweg 13. Lab. voor autom. verkeerssystemen. TH-Delft, 1973.

Hoeven, W.J. ter & Koster, J. Een apparaat waarmee clustervorming op autowegen gedetecteerd kan worden. Lab. voor autom. verkeerssystemen. TH-Delft, 1971.

Montroll, E.W. Acceleration noise and clustering tendency of vehicular traffic. In: Herman, R. (ed.) Theory of traffic flow. Proc. Symp. on the theory of traffic flow. Elsevier, Amsterdam, 1961.

Pahl, J. & Sands, T. Vehicle interaction criteria from time series measurements. *Transportation Science* 5 (1971) 4: 403-417.

Schlums, J. & Burkhardt, F. Beobachtung des Verkehrsablaufs auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg vor und nach Aufhebung einer Geschwindigkeitsbeschränkung. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* 45. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1966.

Schlums, J. & Burkhardt, F. Änderung des Fahrverhaltens auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg in den Jahren 1963 bis 1966. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* 92. Bundesminister für Verkehr. Bonn, 1969.

Taylor, M.A.P.; Miller, A.J.; Ogden, K.W. A comparison of some bunching models for rural traffic flow. *Transportation Research* 8 (1974) 1: 1-9.

Underwood, R.T. Traffic flow and bunching. *Journal of Australian Road Research* 2 (1963) June: 8-25.