

STATE OF THE ART RAPPORT "VERKEERSSTROOMMODELLEN"

Deel VIII. Microscopische verkeersstroommodellen

R-78-42

Ir. H. Botma

Voorburg, 1978

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

## INHOUD

### Samenvatting

### Symbolen

1.	<u>Inleiding</u>	1
2.	<u>Manoeuvre-modellen</u>	3
2.1.	Volgen	3
2.1.1.	Inleiding	3
2.1.2.	Modellen	4
2.1.3.	Toetsing	13
2.1.4.	Toepassingen	19
2.2.	Inhalen	22
2.2.1.	Inleiding	22
2.2.2.	Tweerichtingsverkeer op twee rijstroken	22
2.2.3.	Eenrichtingsverkeer op meer dan een rijstrook	26
2.2.4.	Toepassingen	29
3.	<u>Simulatiemodellen</u>	30
3.1.	Definitie	30
3.2.	Modelementen	30
3.3.	Activiteiten bij een simulatie	32
3.4.	Globale kenmerken van een simulatiemodel	33
3.5.	Een aantal recente modellen	33
3.6.	Toepassingen	39
3.7.	Relatie met verkeersveiligheidsonderzoek	41
4.	<u>Slotbeschouwing</u>	44
4.1.	Volgmodellen	44
4.2.	Inhaal- en strookwisselmodellen	44
4.3.	Simulatiemodellen	45

### Afbeeldingen

### Literatuur

## SAMENVATTING

In het achtste deel van het State of the art rapport "Verkeersstroommodellen" worden de microscopische verkeersstroommodellen behandeld, namelijk de manoeuvremodellen volgen, strookwisselen en inhalen, en de meer volledige simulatiemodellen van een verkeersstroom, waarin diverse manoeuvremodellen zijn opgenomen.

Van de vele volgmodellen worden de belangrijkste behandeld, waarbij de evolutie wordt gevolgd van eenvoudige en sterk mechanistische modellen naar degene die de beperkingen van bestuurder en voertuig opnemen. Onderzoek van volgmodellen valt uiteen in het bepalen van perceptiemogelijkheden van bestuurders, het onderzoek van het volgedrag in laboratoria en in gewoon verkeer. Enige toepassingen van de volgmodellen, bij indicatie, ontwikkeling en evaluatie van hulpmiddelen voor bestuurders bij de rijtaak, worden aangegeven.

Strookwisselen en inhalen worden geanalyseerd in termen van de voor deze manoeuvres benodigde en beschikbare ruimte. Behandeld wordt wat er bekend is van de voor deze manoeuvres relevante perceptiemogelijkheden van bestuurders en wat de benodigde ruimte is op grond van de voertuigkenmerken. Onderzoek in reëel verkeer komt meestal neer op het bepalen van de zogenaamde gap-acceptance functie, die de kans aangeeft dat een bestuurder de manoeuvre begint in afhankelijkheid van zekere condities.

Meer volledige beschrijvingen van de verkeersstroom op microscopische schaal zijn alleen met behulp van simulatiemodellen te realiseren. Hierbij worden de voertuigbewegingen nagebootst met behulp van een digitale rekenmachine, op grond van deterministische en toevalsafhankelijke regels. Naast algemene aspecten van deze in opkomst zijnde modellen worden er een aantal recente voorbeelden van besproken. Toepassingen liggen

vooral op het gebied van afwikkelingsaspecten van de verkeers-  
stroom. Daarnaast wordt de mogelijke relatie met verkeersvei-  
ligheidsonderzoek behandeld.

## SYMBOLLEN

a	versnelling van de volger
d	drempelwaarden
g	gap
P	kans
$p_i$	parameters volgmodel nr. 7
r	stochastisch proces bij volgmodel nr. 6
R	benodigde ruimte
s	volgafstand
S	beschikbare ruimte
t	tijd
T	presentatietijd
v	snelheid
$v_a$	snelheid van de inhaler
$v_p$	snelheid van de ingehaalde
$v_r$	relatieve snelheid van de volger
$\alpha$	parameter volgmodel nr. 2
$\beta$	parameter volgmodel nr. 2
$\lambda$	gevoeligheid volgmodel nr. 1
$\mu$	parameter volgmodel nr. 2
$\tau$	responsietijd

## 1. INLEIDING

In deel VII van dit rapport zijn de microscopische verkeersstroomkenmerken behandeld. Dit waren onder meer de ritduur, het snelheids- en versnellingsverloop en daaruit af te leiden grootheden als bv. versnellingsruis. In feite volgen deze grootheden alle uit de individuele voertuigtrajectoriën. In dit deel komen in feite ook de voertuigtrajectoriën aan de orde, in de vorm van interacties tussen voertuigen in elkaars omgeving, die op microscopisch niveau worden beschreven.

Er is een hoofdingdeling gemaakt naar manoeuvres. Als eerste komt het volgen aan de orde. Deze manoeuvre is van oudsher veel bestudeerd wat heeft geleid tot een grote verscheidenheid aan modellen. Hiervan zullen de belangrijkste besproken worden, waarbij tevens de evolutie tot uiting zal komen van sterk mechanistische modellen naar die welke de eigenschappen - vooral beperkingen - van de bestuurder opnemen. Volgen wordt overigens niet altijd als een manoeuvre gezien, wellicht omdat het meer als een continu gebeuren beschouwd wordt. Het kan echter ook als een discreet proces beschreven worden, waarbij met korte tussenpozen de cyclus perceptie, beslissing, handeling doorlopen wordt. Een duidelijker manoeuvrekarakter heeft het naderen van een voorligger wat bij het volgen behandeld zal worden.

De tweede hoofdmanoeuvre is het inhalen, vooral van belang te achten op tweestrookswegen, zowel in verband met afwikkelings- als veiligheidsaspecten. Op meerstrookswegen waar tegenliggers geen rol spelen is het inhalen op te vatten als twee afzonderlijk te behandelen strookwisselingen. De manoeuvre strookwisselen is in eerste instantie minder kritisch en daardoor ook minder interessant dan de inhaalmanoeuvre met tegenliggers. Echter bij grote belastingen en in de omgeving van toe- en afritten, waar de strookwisselingen een meer gedwongen karakter krijgen, wordt hun invloed op de kwaliteit van de verkeersstroom belangrijker.

Het kruisen van verkeersstromen blijft in deze rapporten buiten beschouwing en dus ook de manoeuvre kruisen. De manoeuvres invoegen en weven worden eveneens niet behandeld omdat ze opgevat kunnen worden als bijzondere gevallen van kruisen. Voor alle drie genoemde manoeuvres geldt echter dat ze in principe op dezelfde wijze te beschrijven zijn als inhalen en strookwisselen, nl. in termen van benodigde en beschikbare ruimte, en met een gap-acceptance functie die de kans aangeeft dat een bestuurder, gegeven zekere condities, begint met de manoeuvre.

Combinatie van manoeuvremodellen leidt tot meer complete modellen voor de verkeersstroom. Deze zijn dan ook vrijwel meteen zo complex dat ze alleen nog als simulatiemodel zijn te hanteren, d.w.z. dat met behulp van rekenmachines het verkeersproces wordt nagebootst. Hierbij kunnen de modelregels dan zowel een deterministisch als een toevalskarakter hebben, terwijl ook verschillen tussen voertuigen en bestuurders in het model opgenomen kunnen worden. De ontwikkeling van complexe simulatiemodellen, die wellicht realistischer zijn dan meer eenvoudige en dan de noodzakelijk schematische analytische modellen, is nog vrij recent en pas mogelijk geworden door de beschikbaarheid van grote rekenmachines. Naast algemene aspecten van de modellen zullen een aantal recente voorbeelden behandeld worden. Tenslotte komt de relatie met verkeersveiligheid aan de orde.

## 2. MANOEUVREMODELLEN

### 2.1. Volgen

#### 2.1.1. Inleiding

Van een stroom voertuigen op een rijstrook worden alleen de bewegingen evenwijdig aan de richting van de weg (longitudinale bewegingen) beschouwd. Dit komt er op neer dat de voertuigen voorgesteld kunnen worden door punten of strepen die zich langs een lijn bewegen. Een zeker voertuig  $j$  volgt dan voertuig  $j-1$  op een afstand die in de tijd varieert. Het longitudinale gedrag van de voertuigen zal afhankelijk (kunnen) zijn van de volgende factoren:

- voertuigbewegingen van voorligger;
- eigen voertuigbewegingen, zowel absoluut als t.o.v. de voorligger;
- voertuigkenmerken van eigen voertuig en voorligger;
- voertuigbewegingen en kenmerken van andere voertuigen in de omgeving (voor-voorliggers, achterliggers, "naastliggers");
- intentie van de bestuurder, bv.: de wens zo spoedig mogelijk in te halen; te willen voorkomen dat een ander voertuig zich tussenvoegt; de volgfafstand zo groot te maken dat het volgen niet te veel inspanning kost;
- globale kenmerken van de verkeersstroom, m.n. de voertuigdichtheid;
- wegkenmerken, bv. rijstrookbreedte, aanwezigheid vluchtstrook;
- maatregelen, bv. inhaalverbod;
- bestuurderskenmerken.

De bestudering van het volggedrag heeft globaal tot doel te bepalen welke factoren de belangrijkste zijn en hoe hiervan de invloed in zijn werk gaat. Bij modellen van het volggedrag wordt in feite de veronderstelling gemaakt dat de longitudinale bewegingen van de volger vooral afhankelijk zijn van de bewegingen van de voorligger.

Vrijwillig volgen komt betrekkelijk zelden voor, uitzonderingen vormen militaire colonnes, uitvaartstoeten e.d. Onvrijwillig volgen komt voor wanneer de wegsituatie of de verkeerstoestand inhalen bemoeilijkt of zelfs onmogelijk maakt.



### 2.1.2. Modellen

De eerste modellen die opgesteld zijn voor het volggedrag kunnen gekenschetst worden als vrij grove mechanistische modellen waarbij de eigenschappen van de mens (vooral in de zin van beperkingen) en van het voertuig hoogstens impliciet aanwezig zijn. Daarna zijn er uitbreidingen gekomen in allerlei richtingen: meer ingewikkelde mechanistische modellen; invoeren van beperkingen van het voertuig; invoeren van beperkingen van de mens; invoeren van invloed van meer voertuigen dan alleen de voorligger. Uiteindelijk heeft dit geleid tot vrij complexe modellen die in feite alleen nog met behulp van simulatietechnieken hanteerbaar zijn.

In het kort zullen in het volgende een aantal karakteristieke modellen behandeld worden. Er is afgezien van het presenteren van een meer volledig overzicht van alle modellen die ooit in de literatuur behandeld zijn, omdat dit het beeld van de stand van zaken niet verduidelijkt. Achtereenvolgens zullen behandeld worden:

1. Model met constante gevoeligheid
2. Model met variabele gevoeligheid
3. Model met voertuigbeperkingen
4. Model met bestuurdersbeperkingen
5. Model met effect van voertuigen voor de leider
6. Model met versnellingsruis
7. Simulatiemodel

De volgende notatie zal gebruikt worden (zie ook Afbeelding 1):

$v(t)$  = snelheid als functie van de tijd  $t$

$a(t)$  = versnelling (van de volger) als functie van de tijd

$s(t)$  = (netto) volgafstand als functie van de tijd

$v_r(t)$  = relatieve snelheid van de volger =  $v_2(t) - v_1(t)$

$\tau$  = responsietijd

#### 1. Model met constante gevoeligheid

Het zogenaamde lineaire car-following model wordt beschreven met

de volgende eenvoudige formule:

$$a(t+\tau) = -\lambda v_r(t)$$

Dat wil zeggen dat de versnelling van de volger ( $a$ ) op het moment  $t+\tau$  gelijk is aan een constante ( $\lambda$ ) maal de relatieve snelheid ( $v_r$ ) op het moment  $t$ . In de responsietijd  $\tau$  is zowel die van bestuurder als voertuig opgenomen, d.w.z. de tijd die de bestuurder nodig heeft voor waarnemen, verwerken, beslissen en handelen plus de mechanische traagheden van het voertuig. Het minteken (bij positieve  $\lambda$ ) is nodig om te bewerkstelligen dat  $a$  negatief wordt (vertragen) als de volger sneller rijdt dan de leider ( $v_r$  positief).

Opm.: In de meeste literatuur komt het minteken niet voor omdat de relatieve snelheid gedefinieerd wordt als  $v_1 - v_2$ .

De modelformule kan ook opgevat worden als een concretisering van de formulering: responsie is gevoeligheid maal stimulus. De responsie correspondeert dus met de versnelling van het voertuig, het resultaat van de bediening van gas en rem. De stimulus komt overeen met de relatieve snelheid en de gevoeligheid is in dit eenvoudige model constant.

Met behulp van dit eerste model is een analyse van de stabiliteit mogelijk, zowel van een individuele volger als van een rij voertuigen die alle volgens hetzelfde model reageren.

#### A. Locale stabiliteit (individuele volger)

Nagegaan wordt wat het karakter van de beweging van de volger is, gekarakteriseerd door het verloop van de volgafstand  $s$ , ten gevolge van een willekeurige fluctuatie in de snelheid van de leider. Het blijkt (o.a. met behulp van harmonische storingsrekening) dat als het produkt  $\lambda\tau$  groter is dan een zekere waarde, de volgafstand periodiek gaat verlopen met een groeiende amplitude, m.a.w. er treedt instabiel volgedrag op.

Meer precies geformuleerd geldt het volgende:

$\lambda\tau > \pi/2 (\approx 1,57)$   $\longrightarrow$  s periodiek met groeiende amplitude  
 $\lambda\tau = \pi/2$   $\longrightarrow$  s periodiek met constante amplitude  
 $e^{-1} (\approx 0,37) \leq \lambda\tau < \pi/2$   $\longrightarrow$  s periodiek met afnemende amplitude  
 $\lambda\tau < e^{-1}$   $\longrightarrow$  s a-periodiek en gedempt

Dit betekent dat het volggedrag stabiel(er) wordt naarmate gevoeligheid en responsietijd dalen of, anders geformuleerd, laat en heftig reageren is ongunstig voor de stabiliteit.

### B. Asymptotische stabiliteit (rij van volgers)

Hierbij wordt nagegaan hoe een verstoring zich voortplant langs een rij van voertuigen. Op analoge wijze blijkt dat als  $\lambda\tau$  groter is dan 0,5 de verstoring aangroeit, m.a.w. de opeenvolgende voertuigen vertonen steeds grotere snelheids- en volgafstandsfluctuaties.

Vergelijking van beide resultaten leert dat de voorwaarde voor asymptotische stabiliteit veel strenger is dan die voor locale.

De resultaten van de stabiliteitsanalyse zijn vermoedelijk een belangrijke drijfveer geweest achter de opbloei van onderzoek van volggedrag omstreeks 1960. Hiermee leek namelijk een "verklaring" gevonden te zijn voor stremmingen en kop-staartbotsingen die als het ware uit het niets ontstaan. In een rij voertuigen verlaagt om een of andere reden een voertuig zijn snelheid. De achterliggers reageren daar successievelijk steeds heftiger op en na een aantal voertuigen leidt dit tot een zeer lage snelheid of stilstand (stremming) of zelfs tot een kop-staartbotsing. Deze verklaring is echter niet geldiger dan het er aan ten grondslag liggende model, waarop veel kritiek mogelijk is.

In feite is in dit eenvoudige model al een stukje van de mens- en machinebeperking opgenomen in de vorm van de responsietijd. Historisch is hieraan hetzelfde model met responsietijd gelijk aan nul vooraf gegaan, echter behandeling hiervan leek overbodig.

### 2. Model met variabele gevoeligheid

Het is niet zo aannemelijk dat de gevoeligheid van het vorige model

constant is. Variaties er in, als gevolg van die in volgafstand en eigen snelheid, zijn op de volgende wijze in model gebracht:

$$a(t+\tau) = -\mu \frac{v_2(t+\tau)^\beta}{s(t)^\alpha} v_r(t) \quad \text{met } \alpha \text{ en } \beta \text{ positief}$$

De constante gevoeligheid  $\lambda$  is hier dus vervangen door een constante  $\mu$  maal  $v_2^\beta$  en  $s^{-\alpha}$ . Het is natuurlijk mogelijk andere typen functies van  $v_2$  en  $s$  te kiezen, wat ook wel gebeurd is; zie bv. Ceder (1974). In feite zijn de zo ontstane modellen nog even mechanistisch als het voorgaande.

Door het niet-lineaire karakter van dit model is een analyse van de stabiliteit nu moeilijker. Köhler (1974) heeft dit onderzocht door een voertuigstroom te simuleren die zich exact volgens het model gedraagt. Uitgegaan is van een rij voertuigen met alle dezelfde volgafstand  $s_0$  en snelheid  $v_0$ . Nagegaan wordt hoe een snelheidsverstoring doorwerkt. De stabiliteit is nu afhankelijk van de waarden van  $\mu, \tau, \alpha, \beta, s_0, v_0$ . Gegeven  $\alpha$  en  $\beta$  treedt er eerder stabiliteit op, d.w.z. is het stabiele gebied voor  $\mu, \tau$  combinaties groter, naarmate  $s_0$  groter en  $v_0$  kleiner is. Anderzijds is, gegeven  $s_0$  en  $v_0$ , de stroom stabiel naarmate  $\alpha$  kleiner en  $\beta$  groter is.

### 3. Model met voertuigbeperkingen

Bij de voorgaande modellen is de voertuigversnelling zowel naar boven als beneden onbegrensd, terwijl voertuigen in werkelijkheid over een beperkt acceleratie- en remvermogen beschikken. Dit is o.a. in model gebracht door Lewis (1970), die het model 1 aanvult met een beperkt waardenbereik voor de versnelling dat nog van de snelheid afhangt; zie Afbeelding 2.

De consequenties van deze aanvulling zijn nog slechts summier onderzocht. Vermeldenswaard is dat er gevallen bestaan die ten gevolge van de beperking in de versnelling van instabiel naar

stabiel overgaan. Ook in dit geval is een algemene analyse van de stabiliteit moeilijk door het niet-lineaire karakter van het model. Alleen numerieke methoden zijn nog toepasbaar.

#### 4. Model met bestuurdersbeperkingen (voor wat betreft perceptie- en doseringsvermogen)

Mensen kunnen geen willekeurig kleine stimuli waarnemen en ook hun responsie kan niet willekeurig klein zijn. Met deze twee factoren is rekening gehouden in het zgn. "action-point" model van Todosiev (zie Todosiev, 1964 en Leutzbach, 1972). De gang van zaken bij dit model laat zich het beste illustreren met behulp van trajectoriën in het  $v_r, s$  vlak, die de "toestandsveranderingen" van de volger representeren.

Verondersteld wordt dat:

- als de afstand  $s$  groter is dan een grenswaarde  $s_g$ , dan is er geen responsie;
- als de relatieve snelheid  $v_r$  kleiner is dan een grenswaarde, die nog afhankelijk is van de afstand en genoteerd wordt als  $v_{rg}(s)$ , dan is er geen responsie;
- de responsie bestaat uit sprongsgewijze veranderingen in de versnelling.

Dit leidt tot de in de Afbeelding 3 geschetste gang van zaken, waarbij is aangenomen dat de snelheid van de leider constant is. De volger nadert de leider met een constante relatieve snelheid  $v_0$ . Bij A wordt de perceptiedrempel  $v_{rg}$  overschreden en bestaat de responsie uit een vaste negatieve versnelling. Dit leidt voor de toestandstrajectorie tot een parabool met as  $v_r = 0$ . Bij C wordt de andere perceptiedrempel overschreden en gereageerd met een positieve versnelling tot aan B, enz. Zodoende ontstaat een slingering in de relatieve snelheid en volgafstand, die met pendelen wordt aangeduid.

In de uitgebreidere versie van het model worden de perceptiedrempels door een gebied in plaats van een lijn aangegeven, zijn ze verschillend voor positieve en negatieve  $v_r$  en is ook de responsie niet steeds even groot. Hiermee worden de verschillen tussen bestuurders en het niet volledig consistent zijn van een bestuurder

gemodelleerd. Bovendien volgt de responsie pas de responsietijd na het overschrijden van de drempels. Ook het effect van het gebruik van remlichten door de leider op de perceptie en responsie kan toegevoegd worden. Met deze uitbreidingen worden de trajectoriën natuurlijk veel minder regelmatig en wellicht realistischer. Zie Afbeelding 4 voor een geschematiseerd voorbeeld, waarbij tevens is verondersteld dat de volger al pendelend geleidelijk de volgafstand vergroot en dit af en toe weer corrigeert.

De perceptiedrempels zijn in eerste instantie met laboratoriumonderzoek bepaald en daardoor vermoedelijk wat te optimistisch voor wat betreft de capaciteiten van de bestuurders.

Het behoeft geen betoog dat dit model niet analytisch hanteerbaar is. Het is wel geschikt om opgenomen te worden in een simulatiemodel. Opvallend is dat in dit model niet de grootte van de responsie beschreven wordt, terwijl dat in de voorgaande modellen juist centraal staat.

#### 5. Model met effect van voertuigen voor de leider

Het is niet onaannemelijk dat een volger behalve op de directe voorligger ook reageert op voertuigen die daar voor rijden, al zullen van de laatste in het algemeen de bewegingen veel moeilijker observeerbaar zijn. Bexelius (1968) heeft dit in model gebracht door model 1 als volgt uit te breiden:

$$a(t+\tau) = -\lambda_1 v_r^{(1)}(t) - \lambda_2 v_r^{(2)}(t)$$

met index 1 en 2 resp. aanduidend de voorligger en de "voorvoorligger". Uit een analyse van de stabiliteit blijkt dat dit model hogere intensiteiten toelaat dan model 1, voor dat instabiliteit optreedt.

#### 6. Model met versnellingsruis

Ook als een bestuurder op een perfecte weg zonder invloed van an-

dere voertuigen een constante snelheid probeert te rijden lukt dit niet volkomen. De fluctuaties in snelheid en dus ook versnelling worden in analogie met elektrische verschijnselen ruis genoemd. Meestal wordt als maat voor de grootte van de ruis de standaardafwijking van het verloop van de versnelling als functie van de tijd genomen. Helaas is de gewoonte ontstaan dit specifieke kenmerk van de ruis kortweg versnellingsruis te noemen. In principe is het vrij eenvoudig deze ruis aan de modellen toe te voegen; model 1 verandert dan in (zie bv. Montroll, 1961):

$$a(t+\tau) = -\lambda v_r(t) + r(t)$$

waarbij  $r(t)$  een stochastisch proces is.

### 7. Simulatiemodel

Complexe modellen voor het volgedrag zijn uitsluitend nog hanteerbaar met behulp van simulatietechnieken. Voorbeelden van vrij uitvoerige simulatiemodellen zijn beschreven door Fox & Lehman (1967) en Wiedemann (1974). Het laatste zal hier kort besproken worden.

Het model kan opgevat worden als een uitwerking van voornamelijk model 4, maar in feite zijn vrijwel alle elementen uit de behandelde modellen er in opgenomen.

De verschillen tussen bestuurders en de inconsistentie van de bestuurders worden gerepresenteerd met vijf parameters, waarvan de waarde bepaald wordt via lotingen uit bepaalde verdelingen. De parameters zijn:

- $p_1$ , schattingsparameter; hierin wordt het verschil in perceptievermogen gerepresenteerd.
- $p_2$ , risicoparameter; acceptabele volgafstanden zijn verschillend per bestuurder.
- $p_3$ , doseringsparameter; representeert de verschillen in precisie waarmee de versnellingsniveau's gerealiseerd worden.

- $p_4$ , versnellingsbenuttingsparameter; niet alle bestuurders benutten in gelijke mate het maximale bereik van de versnellingen (zowel naar boven als beneden).
- $p_5$ , inconsistentieparameter; bovengenoemde parameters worden een maal geloot per voertuig-bestuurder combinatie en zijn verder constant,  $p_5$  wordt op elk relevant moment van het volgproces opnieuw geloot.

Verder spelen bij het volgproces de volgende drempels een rol (zie Afbeelding 5).

- $d_1$ , wensafstand bij stilstand; deze is gemiddeld  $6\frac{1}{2}$  m (bij personenauto's) en daaromheen normaal verdeeld, dit wordt bereikt via afhankelijkheid van  $p_2$ .
- $d_2$ , minimale wensafstand bij kleine  $v_r$ ; het gemiddelde is afhankelijk van de snelheid  $v$  (evenredig  $\sqrt{v}$ ), daaromheen is deze grootte normaal verdeeld en afhankelijk van  $p_2$ .
- $d_3$ , maximale wensafstand bij het pendelen; het gemiddelde is afhankelijk van  $d_2-d_1$ , verder is  $d_3$  normaal verdeeld en afhankelijk van  $p_1$ ,  $p_2$  en  $p_5$ .
- $d_4$ , perceptiedrempel bij het naderen van grote afstand; het bereik van  $d_4$  is 25 tot 75 maal  $\sqrt{v_r}$  (in m met  $v_r$  in m/s), daarbinnen is  $d_4$  normaal verdeeld en afhankelijk van  $p_1$  en  $p_2$ .
- $d_5$ , perceptiedrempel voor positieve  $v_r$  bij het pendelen; bij deze drempel zijn de verschillen tussen de bestuurders erg groot; de grootte is scheef verdeeld naar rechts en afhankelijk van  $p_1$ ,  $p_2$  en  $p_5$ .
- $d_6$ , drempel voor negatieve  $v_r$  bij het pendelen; deze is ca. 2 maal zo groot als  $d_5$  en evenzo scheef verdeeld en afhankelijk van  $p_1$ ,  $p_2$  en  $p_5$ .
- $d_7$ , afstand waarboven, ongeacht  $v_r$ , geen beïnvloeding plaats vindt.

De geringe versnellingen die optreden bij het pendelen na het passeren van de drempels  $d_5$  of  $d_6$  zijn normaal verdeeld. Het bereik voor positieve en negatieve versnellingen is  $0-0,4 \text{ m/s}^2$  en de waarde is afhankelijk van  $p_3$  en  $p_5$ .



De maximale en minimale haalbare versnelling is afhankelijk van de snelheid en het voertuigtype. Er wordt gewerkt met een gemiddeld voertuig en via een afhankelijkheid van  $p_4$  wordt gemodelleerd dat de capaciteit maar zelden gebruikt wordt.

De grootte van de vertraging bij het naderen van grote afstand bij het passeren van drempel  $d_4$  wordt als volgt bepaald:

$$a_{\text{volger}} = a_{\text{leider}} + \frac{1}{2} v_r^2 / (d_2 - s)$$

De term  $a_{\text{leider}}$  treedt alleen op als ze zo groot is dat de remlichten branden. Bij de zo bepaalde theoretisch benodigde versnelling wordt een stochastische variabele opgeteld, afhankelijk van  $p_1$  en  $p_5$ , die de niet volledige kennis van de bestuurder representeert. Al remmende wordt de variantie hiervan kleiner, waarmee een leerproces wordt gemodelleerd.

Indien de volgfafstand kleiner dan  $d_2$  wordt, treedt een noodremming op. De daarbij optredende versnelling is in eerste instantie:

$$a_{\text{volger}} = a_{\text{leider}} + \frac{1}{2} v_r^2 / (d_1 - s) + a_{\text{min}} (d_2 - s) / (d_2 - d_1)$$

waarbij  $a_{\text{min}}$  de benutte minimale versnelling is. Daarna wordt hier een stochastische variabele bij opgeteld, afhankelijk van  $p_1$  en  $p_5$ . De uiteindelijke waarde moet natuurlijk binnen de eerder genoemde grenzen blijven, zo niet dan wordt de grenswaarde zelf genomen.

De responsietijd is normaal verdeeld met bereik 0,5 tot 1,5 s en afhankelijk van  $p_5$ . Bovendien treedt er indien de remlichten van de voorligger branden een niet nader beschreven verlaging op.

De voorligger van de leider heeft op twee manieren effect op het gedrag van de volger. Ten eerste wordt de drempel  $d_2$  van de volger verhoogd als de volgfafstand van de leider kleiner is dan de oorspronkelijke  $d_2$  van de volger. Ten tweede heeft het ontsteken van de remlichten van de voorligger van de leider tot gevolg dat de volger met grotere precisie remt.

Opm.: In het voorgaande is sprake geweest van normale verdelingen met een eindig bereik, wat in feite niet kan. De normale verdelingen zijn blijkbaar afgeknot en hebben een bereik van gemiddelde plus en min  $3 \frac{1}{3}$  maal de standaardafwijking.

Met het model zijn een aantal volggeshiedenissen bepaald, waarvan Afbeelding 6a een voorbeeld is. Kwalitatief stemt het karakter van de trajectoriën overeen met experimenteel bepaalde; zie Afbeelding 6b.

### 2.1.3. Toetsing

Onderzoek naar de mate waarin de diverse volggedragmodellen de realiteit beschrijven is op verschillende manieren mogelijk:

- rijnsimulators in een laboratorium;
- geïnstrumenteerde voertuigen op een laboratoriumweg of in reëel verkeer (proefpersonen);
- observaties in reëel verkeer (geen proefpersonen).

In de genoemde volgorde geldt hiervoor globaal het volgende:

- de kosten nemen toe t.g.v. de benodigde meetapparatuur en de omvang van de metingen;
- de proefopzet wordt steeds moeilijker (scheiding en instelbaarheid van factoren);
- de mogelijkheid tot onderzoek van kritische situaties neemt af;
- generaliseerbaarheid van resultaten naar reële verkeerssituaties neemt toe.

### Bepaling van drempelwaarden

Todosiev (1966) onderzocht drempelwaarden van relatieve snelheden in een laboratorium met een nagebootste volgsituatie bij nacht. De stimulus bestond uit de verandering van de hoek waaronder de beide achterlichten werden gezien. De afhankelijkheid van de drempelwaarde van de presentatietijd (bereik 0,3 tot 5,0 s) en de afstand (20 tot 83 m) werd onderzocht. De drempelwaarde was groter naarmate de presentatietijd korter en de afstand groter was. Tevens was de drempelwaarde groter voor verwijderen dan voor naderen.

Zijdeling wordt nog opgemerkt dat in de dagsituatie de drempelwaarden hoger zijn dan 's nachts, wat nogal verrassend is.

Bovenstaand onderzoek is uitvoeriger gedaan door het Instituut voor Zintuigfysiologie van TNO, in opdracht van de SWOV; zie Janssen (1974). De drempelwaarde van de relatieve snelheid wordt globaal gekarakteriseerd door de formule:

$$v_{r,\text{grens}} = \frac{T}{36,72 T - 15,17} s^{5/4} \quad (\text{N.B. constanten niet dimensieloos})$$

met presentatietijd  $T$  in s, afstand  $s$  in m en  $v_r$  in km/h. De afstand tussen de achterlichten bedroeg 1,4 m. Onderzocht zijn presentatietijden van 1/2, 1, 2 en 4 s en afstanden van 40 tot 640 m. Het onderzoek is uitgevoerd in een laboratorium en de resultaten zijn bevestigd in een gecontroleerd veldexperiment (geinstrumenteerd voertuig met proefpersonen). Ook bij dit onderzoek bleek de drempel voor naderen lager te liggen dan voor verwijderen. Tevens is gebleken dat de grootte en de helderheid van de achterlichten te verwaarlozen stimuli zijn ten opzichte van de hoekverandering. Het verschil tussen de diverse proefpersonen was vrij groot (variatiecoëfficiënt 0,5).

Gegeven dat er een perceptiedrempel wordt overschreden volgt daar niet noodzakelijk een reactie op. Hoefs (1972) heeft drempelwaarden in de volgafstand onderzocht, waarbij een achterligger begint met de snelheidsaanpassing aan een voorligger, welke laatste niet meteen ingehaald kan worden. De voorligger was een niet als zodanig herkenbare geinstrumenteerde auto die de eigen beweging en die van de achterligger registreerde. Onderzocht is de volgende situatie: het proefvoertuig reed met constante snelheid op de linker rijstrook van de 2-strooksrijbaan van een autosnelweg enige voertuigen op de rechter rijstrook voorbij. Dit betekende o.a. dat de volgers verwachtten dat ze het proefvoertuig slechts korte tijd behoeften te volgen alvorens het te kunnen inhalen. De gevonden drempelwaarden,  $s_{\text{grens}}$ , worden voorgesteld met de formule:

$$s_{\text{grens}} = (25 \text{ à } 40) \sqrt{v_r} \quad \text{met } s \text{ in m en } v_r \text{ in m/s}$$

Volgens deze formule wordt bv. bij een snelheidsverschil van 25 km/h op een afstand van 66 à 105 m begonnen met de snelheidsaanpassing.

Uit het eerder genoemde onderzoek van Janssen is af te leiden dat gegeven de relatieve snelheid en de presentatietijd de perceptiedrempel voor de afstand bedraagt:

$$s_{\text{grens}} = \left( v_r \frac{36,72 T - 15,17}{T} \right)^{4/5}$$

met  $T = 1s$  wordt dit  $s_{\text{grens}} = 32,49 v_r^{4/5}$  met  $s$  in m en  $v_r$  in m/s.

Volgens deze formule is een snelheidsverschil van 25 km/h op ca. 153 m waarneembaar, m.a.w. de perceptiedrempel is groter dan de responsdrempel, zoals te verwachten. Geheel vergelijkbaar zijn de resultaten van Hoefs en Janssen echter niet, omdat de eerste een situatie bij dag en de tweede een bij nacht heeft beschouwd. Bij dag is het niet duidelijk wat de belangrijkste stimulus is voor het schatten van relatieve snelheden en afstanden. Bij het resultaat van Hoefs dient ook nog opgemerkt te worden dat het gebaseerd is op slechts 22 naderingen en dat bovendien bij grote afstanden de meetfout van de relatieve snelheid nogal groot was.

#### Onderzoek met geïnstrumenteerde voertuigen en proefpersonen

Gelijktijdig met de ontwikkeling van de eerste volggedragmodellen (model 1 en 2 van het overzicht) is vrij veel toetsend onderzoek uitgevoerd met Herman als centrale figuur. Hierbij is de volgende meetmethode gebruikt. De volger was uitgerust met een snelheids- en versnellingsmeter. Het meettechnisch moeilijke punt, bepaling van volgafstand en relatieve snelheid, is opgelost m.b.v. een dunne draad tussen de twee voertuigen die automatisch werd strak gehouden en waarvan de lengte werd gemeten. De experimenten zijn uitgevoerd op laboratoriumwegen en in gewoon verkeer. De belangrijkste resultaten zijn:

- Chandler et al (1958), experiment op laboratoriumweg, 8 proefpersonen.

Het eenvoudige model 1 paste vrij goed (correlatiecoëfficiënt 0,5 tot 0,9). Responsietijden  $\tau$  varieerden van 1,0 tot 2,2 (gemiddelde 1,5 s), gevoeligheden  $\lambda$  van 0,17 tot 0,74 s<sup>-1</sup> (gemiddelde 0,37) en het product  $\lambda\tau$  van 0,18 tot 1,04 (gemiddelde 0,56), wat betekent dat in veel gevallen de grenswaarde voor asymptotische stabiliteit (0,5) overschreden werd.

- Herman & Potts (1961), experimenten op laboratoriumweg (8 proefpersonen) en tunnels in New York (11 proefpersonen).

Een bepaalde variant van model 2 ( $\alpha = 1$  en  $\beta = 0$ ) paste meestal vrij goed mits de volgafstand kleiner dan 60 m was. Soms paste het model echter ook slecht, bv. als beide voertuigen dezelfde snelheid en vertraging hadden. Volgens het model moet immers de versnelling van de volger nul zijn als de relatieve snelheid nul is.

Meer globaal is de responsietijd als volgt onderzocht. Van een cluster van 11 voertuigen met een snelheid van ca. 65 km/h remde plotseling de eerste sterk af. Gemeten is na hoeveel tijd de remlichten van het laatste voertuig gingen branden. De gemiddelde responsietijd is bepaald bij drie condities: bestuurders mogen alleen reageren op de remlichten van hun voorligger; bestuurders mogen op alles reageren; als vorige maar remlichten van alle voertuigen buiten werking gesteld behalve de eerste en laatste; en bedroeg resp. 0,63, 0,50 en 1,01 s. Het grote effect van remlichten op de responsietijd wordt hiermee afdoende gedemonstreerd.

- Herman et al (1965), experimenten op laboratoriumweg.

. In plaats van twee werden nu drie voertuigen bemeten en werd nagegaan in hoeverre de voorligger van de leider effect had.

De voorlopige conclusie was dat de directe voorligger voor veruit het grootste deel het volgedrag bepaalt.

. Een model met een grotere (25% meer) gevoeligheid voor naderen dan voor verwijderen bleek iets beter te passen dan dat met een constante gevoeligheid.

. Onderzocht is het effect van een extra signaallicht op de achterkant van de leider: blauw bij een positieve versnelling, geel bij "coasting" (gas loslaten zonder te remmen) en rood bij bediening rem. Het bleek dat t.o.v. de normale toestand de responsietijd daalde (ca. 50%), echter de gevoeligheid steeg dusdanig dat het product en daarmee de mate van stabiliteit gelijk bleef. Tevens

daalde de volgfstand zodat de winst voor dit systeem eerder in termen van capaciteit dan veiligheid zal liggen.

### Volggedrag in gewoon verkeer

Naast het eerder behandelde aspect van het naderingsgedrag heeft Hoefs (1972) ook het meer stationaire volgen onderzocht, waarbij dezelfde meetmethode gebruikt is.

De situatie bij het onderzoek was de volgende: Op een drukke autosnelweg werd van willekeurige volgers over een weglengte van 2,4 km het volggedrag geregistreerd. De meetwagen gedroeg zich zo veel mogelijk normaal maar introduceerde wel af en toe extra snelheidswisselingen.

Er zijn 54 volghistories geregistreerd en geanalyseerd.

Bij de analyse is onderzocht voor welke parameterwaarden model 2 het beste paste en wel voor alle volghistories en voor drie deelverzamelingen, zodat er vier "gevallen" ontstonden:

1. alle volghistories;
2. gedeelten van de volghistories waarbij  $v_r$  negatief was (verwijderen) en het remlicht niet brandde;
3. gedeelten waarbij  $v_r$  positief was (naderen) en het remlicht niet brandde;
4. gedeelten waarbij het remlicht brandde.

De resultaten waren:

geval	$\alpha$	$\beta$
1	1,1	0,4
2	0,5	0,2
3	1,5	0,4
4	2,5	0,2

$\tau$  varieerde van 0,5 tot 2,0

$\lambda\tau$  was in ca. 50% van de gevallen groter dan 0,5, dus asymptotische instabiliteit

De afstand heeft dus meer effect dan de eigen snelheid ( $\alpha > \beta$ ). Verder heeft de afstand meer effect bij naderen dan bij verwijderen en is dit effect nog groter bij gebruik van remlichten, hetgeen beide te verwachten was.

De informatie die dit onderzoek heeft opgeleverd is nog vrij beperkt. Uitbreidingen in allerlei richtingen, bv. variatie van

voertuigtype, wegkenmerken en omstandigheden, zouden nuttig zijn. De onderzoeksmethode is ten gevolge van de arbeidsintensieve meetmethode (precies uitlezen van de foto's van de volger) echter zo kostbaar, dat niet verwacht mag worden dat ze nog veel gebruikt zal worden. Een meer geautomatiseerde meetmethode met behulp van radarapparatuur bleek enig jaren geleden nog te kostbaar in ontwikkeling; zie Botma (1974).

Het onderzoek van Hoefs is zeker niet het enige van volggedrag in normaal verkeer. Het is echter wel het enige waarbij de bereikte meetnauwkeurigheid, zij het in beperkte mate, voldoet aan de eisen die men moet stellen. Ter illustratie hiervan twee voorbeelden waarbij dit niet het geval is.

Gordon (1971) gebruikte een eenvoudige fotomethode voor waarneming van eigen snelheid en afstand tot de achterligger. Een optimistische schatting van de fouten leidt bij een afstand van 50 m tot een fout in de versnelling van de volger van  $2 \text{ m/s}^2$ , en dit is zeker te groot voor een analyse. Overigens is de hoofdconclusie van Gordon, nl. dat het volggedrag niet te allen tijde met een eenvoudige vergelijking (model 1 en 2) te beschrijven is, zeker juist.

Treiterer (1969) gebruikte een luchtfotomethode voor het verkrijgen van voertuigtrajectoriën en analyseerde vervolgens het volggedrag van willekeurige paren voertuigen. De gebruikte meetmethode is in zeker opzicht ideaal omdat ze een zeer compleet beeld van de totale verkeersstroom geeft. Het bleek echter dat de meetfout, in de van de foto's af te lezen voertuigposities, zo groot was (ca. 30 cm) en de tijdstap van 1 seconde zo grof, dat het verloop van de versnelling hier niet met voldoende nauwkeurigheid was af te leiden. De analyse van het volggedrag, in de vorm van de bepaling van de parameters van model 1, is daarom in feite niet van belang geweest.

#### 2.1.4. Toepassingen

##### A. Relatie met andere verkeersstroommodellen

- Afleiding van het basisdiagram.

Uit de meer eenvoudige modellen voor het volggedrag (modellen 1 en 2) kan het basisdiagram door integratie verkregen worden. Dit is reeds behandeld in Deel III van het rapport (onder 3.5.).

- Afleiding van macro-dynamisch model.

Het model van Payne (1971), behandeld in Deel IV van het rapport (par. 4.2), is voor een deel gebaseerd op het hier besproken model 2 van het volggedrag.

- Onderdeel van simulatiemodel. Zie Hoofdstuk 5 in dit deel.

##### B. Gebruik bij hulpmiddelen

Analyse van het volggedrag, al of niet in modelvorm, heeft geleid tot suggesties voor modificaties van het voertuig en hulpmiddelen die het volggedrag moeten verbeteren. Dit is van belang gezien het optreden van kop-staartongevallen, die opgevat kunnen worden als het resultaat van verkeerd uitgevoerd volggedrag. Tevens zouden de maatregelen de capaciteit van de weg en het comfort van de bestuurders ten goede kunnen komen.

Genoemd kunnen worden:

- Veranderingen die een betere bediening van het voertuig mogelijk maken. Dit varieert van kleine veranderingen als een andere positie van de pedalen (Wallner, 1969), tot een compleet nieuw bedieningssysteem, waarbij met één stuurknuppel gas, rem en stuur bediend worden (Fenton & Rule, 1971). In termen van de modellen voor het volggedrag kan dit leiden tot een kortere responsietijd en een betere dosering.

- Door Irving (1971) wordt een hulpmiddel beschreven dat een streefwaarde geeft voor de volgafstand, in afhankelijkheid van de eigen snelheid, en tevens veranderingen van de afstand sneller detecteerbaar maakt. Het apparaat, de zgn. "station keeping indicator" maakt twee verticale lijnen op de voorruit zichtbaar en de bestuurder dient de volgafstand zo te regelen dat de voorligger juist tussen de lijnen past. Het systeem verkeert nog in het beginstadium van het ontwerp.



- De bewegingstoestand van een voorligger is vrij slecht waarneembaar. Het enige bestaande hulpmiddel hierbij zijn de remlichten, die echter niet de mate van vertraging aangeven. Er zijn talloze systemen te bedenken die meer informatie geven.

In par. 2.1.3. is reeds een door Herman (1965) onderzocht systeem genoemd, waarbij een positieve versnelling, "coasting" en bediening rempedaal werden gesignaleerd. Irving (1971) beschrijft een systeem van remlichten met drie niveaus, afhankelijk van de gemeten voertuigvertraging. Problemen bij het ontwerp en vooral bij de voorspelling van het effect op de veiligheid van dergelijke systemen, worden behandeld door Roszbach (1971).

- Perceptieproblemen van de bestuurder kunnen voor een groot deel opgelost worden als men de waarneming van volgafstand en relatieve snelheid met instrumenten uitvoert. De technische realisatie hiervan, tegen acceptabele kosten, is overigens nog niet beschikbaar. Er van uitgaande dat dit probleem wel oplosbaar is, hebben Fenton & Rule (1971) onderzocht hoe deze grootheden dan aan de bestuurders gepresenteerd moeten worden. Gekozen werd een "tactiele" representatie (display), die verwerkt was in de reeds in het voorgaande ter sprake gekomen stuurknuppel. Uiteindelijk bleek het beste volgedrag op te treden bij een relatief eenvoudig automatisch regelsysteem. Echter een mengvorm, waarbij de bestuurder alleen de regeltaak verzorgde die hij goed aankon en de automaat de rest, bleek vrijwel even goed te zijn. Hiermee is een systeem opgebouwd met een responsietijd van minder dan één seconde, waarbij de werkelijke volgafstand minder dan  $1/3$  meter (1 ft) van de ideale afwijkt, en de bestuurdersinspanning voor de longitudinale regeltaak geringer is dan bij normale voertuigen.

### C. Gedragsvoorspelling van bijzondere verkeersstromen

Het invoeren van aparte rijstroken voor busverkeer heeft geleid tot interesse voor het gedrag van verkeersstromen die uitsluitend uit bussen bestaan. Het volgen is een belangrijk deel van dit gedrag omdat inhalen vaak onmogelijk is. Door Herman & Lam (1970) is het volgedrag onderzocht en gekarakteriseerd in termen van de eenvoudige modellen (type 1 en 2). Met behulp hiervan zijn bv. de capaciteit en het effect van halteafstanden op reistijden te

schatten. Bij busverkeer is a-priori het gedrag beter met eenvoudige modellen te beschrijven dan bij gewoon verkeer, omdat de voertuigkenmerken vrijwel homogeen zijn en ook de bestuurderskenmerken minder variatie zullen vertonen.

#### D. Voorspelling van het effect van kortere voertuigen

Vooraf in de Verenigde Staten is er belangstelling voor de vraag in hoeverre een verkleining van de voertuigafmetingen een positief effect op de kwaliteit van het verkeer zou kunnen hebben. Te denken valt dan aan een vermindering van het brandstofgebruik, de benodigde parkeerruimte en de congestie. Voor wat betreft de congestie is door McClenahan & Simkowitz (1969) het effect geschat van een halvering (van 6 naar 3 m) van de voertuiglengte. Beschouwd is een stedelijke ader met elke 150 m een verkeerslicht en met veel verkeer. Verondersteld is dat er door gebrek aan inhaal mogelijkheden in feite eenstrooksverkeer optrad. Er is een simulatiemodel opgesteld waarbij het volgen verliep volgens model type 2, aangevuld met een eindig versnellingsbereik. Ook de deelmodellen voor het optrekken van de clusterleiders en het afremmen voor de verkeerslichten waren eenvoudig. Bij diverse graden van congestie, uitgedrukt in het gemiddeld aantal wachtende voertuigen voor een verkeerslicht, is het effect van de voertuiglengte op intensiteit en gemiddelde snelheid bepaald. De maximale winst, 70% grotere intensiteit en 57% hogere snelheid, trad op bij een congestiegraad van 15 wachtende voertuigen voor elk verkeerslicht. Zowel voor meer als minder congestie was de winst geringer. Het totale effect kon goed gerepresenteerd worden door het basisdiagram (zie Afbeelding 7). De capaciteit was ca. 25% groter en de bijbehorende gemiddelde snelheid ca. 10% lager. Het model is beperkt geverifieerd met een gunstig resultaat.

#### E. Ontwerp van automatisch verkeer

In het beginstadium hiervan zijn volgmodellen gebruikt (model 1 en 2) omdat men in eerste instantie de automatische regeling wilde laten aansluiten bij de menselijke, echter dan zonder fouten, met kortere responsietijd en fijnere dosering. Uit het al eerder

genoemde werk van Fenton & Rule (1971) blijkt dat dit in theorie en ten dele ook praktisch gerealiseerd kan worden.

## 2.2. Inhalen

### 2.2.1. Inleiding

Voor de inhaalmanoeuvre is het van groot belang of er al of niet rekening gehouden moet worden met tegenliggers. Daarom worden deze beide gevallen in het volgende apart behandeld.

### 2.2.2. Tweerichtingsverkeer op twee rijstroken

In dit geval is het inhalen een belangrijke manoeuvre waarbij de rijtaak relatief zwaar is. In meer algemene termen is de inhaalmanoeuvre reeds besproken in Deel VI van het rapport. Hier zal de manoeuvre nog wat gedetailleerder beschouwd worden.

De inhaalmanoeuvre kan, evenals andere manoeuvres, als volgt geanalyseerd worden. Voor de manoeuvre is een zekere ruimte nodig, in afstand of tijd uit te drukken. Hoeveel ruimte nodig is voor een bepaalde manoeuvre hangt in eerste instantie af van de bewegingsmogelijkheden van het voertuig (ook van wegkenmerken als bv. stroefheid, maar die worden hier constant verondersteld) en vervolgens van de mate waarin de bestuurder deze mogelijkheden benut. Tegenover de benodigde ruimte staat de beschikbare, die bepaald wordt door de overige verkeersdeelnemers, de wegkenmerken en juridische gedragsregels. De bestuurder moet de benodigde en beschikbare ruimte schatten, vergelijken en beslissen tot al of niet starten met het uitvoeren van de manoeuvre. Hierbij spelen dus de perceptiemogelijkheden van de mens en zijn beslissingscriteria een rol.

### Benodigde ruimte

Grotendeels op grond van voertuigkenmerken kan men uitgaande van een aantal veronderstellingen de theoretisch benodigde ruimte be-

palen. Dit is bv. gedaan door Brilon (1974) die na een uitvoerige beschouwing tot hanteerbare resultaten komt. Onderscheiden worden vliegend en versnellend inhalen.

Het vliegend inhalen is het eenvoudigst omdat daarbij de snelheid van de inhaler constant blijft. Bepaald wordt o.a. de benodigde afstand tot de eerstkomende tegenligger als functie van de snelheden van inhaler ( $v_a$ ) en ingehaalde ( $v_p$ ), zie Afbeelding 8. Hierbij wordt de strookwisseltijd op 3 s gesteld en wordt aangenomen dat de tegenligger een snelheid van 100 km/h heeft.

Bij het versnellend inhalen rijdt de inhaler bij het begin van de manoeuvre met dezelfde snelheid als de ingehaalde. Bij het versnellen wordt de volledige versnellingscapaciteit van het voertuig benut. Dit gebeurt tot dat de snelheidslimiet is bereikt of tot dat de achterkant van de inhaler ter hoogte van de voorkant van de ingehaalde is. Er wordt rekening gehouden met de snelheidsafhankelijkheid van de beschikbare versnelling. De benodigde afstand tot de tegenligger wordt bepaald als functie van de snelheid van de ingehaalde voor drie voertuigtypen, bij drie hoogten van de maximumsnelheid en daarmee gekoppeld verschillende snelheden van de tegenligger. Het blijkt dat zo vrijwel lineaire functies ontstaan tenzij de snelheidslimiet laag is (100 km/h) waardoor vanaf ca.  $v_p = 80$  km/h extra veel afstand nodig is; zie Afbeelding 9.

### Beschikbare ruimte

Deze wordt bepaald door de bewegingskenmerken van de andere voertuigen, juridische gedragsregels en de wegkenmerken. Bij het inhalen gaat het wat betreft het laatste vooral om de zichtlengte. In feite moet de bestuurder de beschikbare ruimte kennen op een toekomstig moment, zodat het behalve om een bepalen van de momentane toestand ook om een voorspelling gaat.

### Perceptie

De bestuurder dient een schatting te maken van de eigen snelheid,

het eigen versnellingsvermogen (bij versnellend inhalen), de afstand tot en de snelheid van de tegenligger. Ook dit aspect is vrij volledig door Brilon (1974) behandeld, met als uitgangspunt een rechte weg, goede zichtcondities en een goede conditie van de bestuurder.

. Eigen snelheid. De conclusie van het verrichte onderzoek is dat de bestuurder in het algemeen een vrij goed idee heeft van zijn eigen snelheid.

. Eigen versnellingsvermogen. Over dit punt is weinig onderzoek gedaan. De indruk bestaat dat bestuurders deze grootte slechts ruwweg kennen.

. Afstand tot tegenligger. Deze grootte kan vrij goed geschat worden. Zo vermeldt het Franklin Institute (1969) bij afstanden van 300 tot 600 m een schattingsfout van  $\pm 20\%$  in 95% van de gevallen. Indien de beschikbare inhaalafstand door een duidelijk zichtbaar star element wordt begrensd (bv. boog) kan de afstand nog beter geschat worden, nl. met een fout van  $\pm 60$  m bij afstanden tot 600 m.

. Snelheid van tegenligger. Het blijkt dat op de afstanden die bij inhalen van belang zijn (400 m en meer) de snelheden vrijwel niet te schatten zijn. In experimenten bleek dat de schatting door het voertuigtype (een sportwagen werd systematisch te snel geschat) beïnvloed wordt.

Meer kennis omtrent het perceptievermogen van bestuurders met betrekking tot de eigen beweging en die van andere voertuigen wordt verzameld in het SWOV-project "Analyse van de rijtaak".

### Beslisproces

Dit is geanalyseerd door Griep (1971) en heeft aanleiding gegeven tot de volgende veronderstellingen:

. De beslissing over het wel of niet uitvoeren van de manoeuvre wordt gebaseerd op waarnemingen van de richting van het verschil tussen beschikbare (S) en benodigde ruimte (R). Een juist waargenomen richting van dit verschil is mogelijk bij een onjuist waar-

genomen absolute grootte van S en/of R.

. Risico is aanwezig als:

a) een juiste positieve beslissing, waarbij dus in werkelijkheid S groter is dan R, gebaseerd is op een onjuist waargenomen absolute grootte van S en/of R;

b) een onjuiste positieve beslissing, waarbij in werkelijkheid S kleiner is dan R, wordt genomen.

. Riskante beslissingen kunnen worden gecorrigeerd; in geval a) door het afbreken of versneld uitvoeren van de manoeuvre, en in geval b) uitsluitend door het afbreken van de manoeuvre.

. Een niet te corrigeren manoeuvre resulteert in een botsing.

. Keuze van een riskanter beslissingscriterium leidt tot een daling van de reistijd en een verhoogde ongevalskans.

### Empirie

Het voorgaande is een voornamelijk theoretisch gerichte analyse van het inhalen. Daarnaast is er geobserveerd hoe inhaalmanoeuvres in werkelijkheid verlopen, zowel op laboratoriumwegen als in normaal verkeer. Daarbij gaat de aandacht voornamelijk naar de uitkomst van het beslissingsproces, d.w.z. wanneer besluiten bestuurders tot een inhaalmanoeuvre, gegeven de kenmerken van de betrokken voertuigen (posities en snelheden) en de wegkenmerken.

De resultaten worden hierbij meestal gepresenteerd in de vorm van een zgn. "gap-acceptance" functie, die de kans  $P$  aangeeft dat een zekere ruimte of gap geaccepteerd wordt. In het in Afbeelding 10 geschetste geval worden gaps kleiner dan  $g_1$  nooit, en gaps groter dan  $g_2$  altijd geaccepteerd. Onder de kritieke gap,  $g_k$ , wordt meestal verstaan de waarde die met een kans van 50% geaccepteerd wordt. Op deze manier worden in het algemeen zowel de verschillen tussen bestuurders als de variatie bij een bestuurder gemiddeld. Het bepalen van de gap-acceptance functie op grond van observaties is geen eenvoudige zaak. De problematiek hierbij en een aantal oplossingen zijn behandeld door Miller (1971).

De belangrijkste resultaten van het onderzoek naar gap-acceptance

bij de inhaalmanoeuvre zijn (Brilon, 1974):

- de kritieke gap in de stroom tegenliggers is groter dan de theoretisch benodigde;
- de kritieke gap, uitgedrukt in afstand, is onafhankelijk van de snelheid van de tegenligger en neemt toe (ongeveer lineair) met de snelheid van het ingehaalde voertuig;
- niet geheel in overeenstemming met het voorgaande is gevonden dat de kritieke gap (uitgedrukt in de tijd tussen het begin van de inhaalmanoeuvre en het moment dat de tegenligger het ingehaalde voertuig ontmoet) onafhankelijk van de snelheden van ingehaald voertuig en tegenligger is.

Het laatste zou betekenen dat  $(a + bv_p)/(v_p + v_t)$ , met  $a$  en  $b$  positieve constanten en  $v_p$  en  $v_t$  snelheid van resp. ingehaalde voertuig en tegenligger, onafhankelijk van  $v_p$  en  $v_t$  is. Blijkbaar gaat deze afhankelijkheid verloren in de andere variatiebronnen, bv. de verschillen tussen de bestuurders.

- over de grenswaarden  $g_1$  en  $g_2$  vermeldt het Franklin Institute (1969) het volgende:

- . 5% van de bestuurders accepteert nog gaps van minder dan 300 m, wat veelal tot gevaarlijke situaties leidt;
- . 25% van de bestuurders accepteert geen ruim voldoende grote gaps en na 900 m neemt de acceptatiekans niet meer toe.

### 2.2.3. Eenrichtingsverkeer op meer dan een rijstrook

In dit geval is de inhaalmanoeuvre goed te scheiden in twee strookwisselmanoeuvres omdat het teruggaan naar de oorspronkelijke rijstrook hier niet zonder meer noodzakelijk is. Het strookwisselen kan op dezelfde manier geanalyseerd worden als de inhaalmanoeuvre.

#### Benodigde ruimte

Nodig is de ruimte om van strook te wisselen en eventueel te versnellen tot de snelheid van de nieuwe achterligger of af te remmen tot de snelheid van de nieuwe voorligger. Op dezelfde wijze als bij de inhaalmanoeuvre zou men de theoretisch benodigde ruimte kunnen bepalen.

### Beschikbare ruimte

Deze wordt beperkt door de andere voertuigen in de strook waarnaar gewisseld wordt. Het gaat hierbij om de ruimte op het moment van beslissen en de ontwikkeling daarvan in de tijd. Dus in principe om posities, snelheden en eventueel nog hogere afgeleiden.

### Perceptie

Voor de perceptie van eigen snelheid en versnellingsvermogen kan verwezen worden naar hetgeen daarover in par. 2.2.2. is opgemerkt. Over de mogelijkheden van de mens tot het schatten van de positie en de (relatieve) snelheid van de achterligger is vrijwel geen informatie in de literatuur te vinden. In analogie met andere gevallen mag verondersteld worden dat de schatting van de afstand redelijk nauwkeurig is en dat de snelheid moeilijk geschat kan worden.

### Beslissingsproces

Dit kan op dezelfde manier worden geanalyseerd als onder 2.2.2. is behandeld.

### Onderzoek

Door Worrall & Bullen (1970) zijn gegevens verzameld van het strookwisselgedrag op een autosnelweg met behulp van luchtfoto's van de verkeersstroom. Bij de strookwisselmanoeuvre werden onderscheiden: de "kop", het gedeelte tussen het begin van de manoeuvre en het moment dat het eerste voorwiel de strookmarkering raakt; de "wissel", aansluitend op de kop tot het moment dat het laatste achterwiel de strookmarkering raakt; en tenslotte de "staart", vanaf de wissel tot het eind van de manoeuvre. De manoeuvre begint als het voertuig gaat afwijken van de rechte koers en eindigt als het die weer aanneemt. De "wisseltijd" was gemiddeld 2,8 s, nam toe met de snelheid en af met de intensiteit van de verkeersstroom. De "koptijd" was gemiddeld 1,25 s (st.afw. 0,4 s) en de



"staarttijd" gemiddeld 1,95 s (st.afw. 0,5 s). Deze tijden zijn in het algemeen groter dan de benodigde. De totale manoeuvretijd is bv. ruim boven de 3 s, die Brilon (1974) als richtwaarde aangeeft. De laterale snelheid tijdens de totale manoeuvre was gemiddeld rond 1 m/s.

Vervolgens zijn de geaccepteerde gaps beschouwd, gedefinieerd als de volgafstand of volgtijd bij het begin van de manoeuvre. De totale gap kan nog verdeeld worden in een "voor-" en "achtergap" (lead en lag); zie Afbeelding 11.

Opm.: De volgtijden zijn in dit geval momentaan en worden gedefinieerd als volgafstand gedeeld door de snelheid van de betreffende achterligger.

Als maatstaf voor een soort minimale acceptabele waarde is het 5% punt van de verdelingen bepaald, bij verschillende dichtheden in de rijstrook waarnaar gewisseld wordt. Gevonden voor de gap zijn de maten 25 tot 100 m (1,1 tot 2,9 s) en voor de voor- en achtergap 4 tot 25 m (0,2 tot 0,7 s). De grote variatie in de waarden kon niet verklaard worden met het verschil in dichtheid. Tenslotte is de gap-acceptance functie bepaald. De kritieke waarden (veronderstellend dat Worrall die met gemiddelden aanduidt) waren voor de totale gap 1,98 s en voor de voor- en achtergap resp. 0,53 en 0,68 s. De toegepaste methode (probit analyse) leidt tot de lognormale verdelingsfunctie:

$$P(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a+b \ln g} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad \text{met } a \text{ en } b \text{ constanten}$$

In een later onderzoek van Munjal & Hsu (1973) zijn op het bovenstaande nog enige aanvullingen te vinden voor wat betreft de snelheden.

Meestal ging de wisselaar naar een in de tijd toenemende gap, dus  $v_4$  groter dan  $v_3$ , en was de snelheid van de nieuwe voorligger groter dan die van de oorspronkelijke, dus  $v_4$  groter dan  $v_2$  (zie Afbeelding 11).

#### 2.2.4. Toepassingen

- De kennis van inhaal- en strookwisselmanoeuvres is toepasbaar bij meer volledige modellen van de verkeersstroom (zie Hoofdstuk 3).
- Analyse van de manoeuvres kan leiden tot indicatie van bepaalde problemen en tot suggesties voor oplossingen. Een uitvoerig voorbeeld van het laatste is de studie van het Franklin Institute (1969) van de inhaalmanoeuvre op tweestrookswegen. Daarin worden hulpmiddelen onderzocht die de taak van de bestuurders kunnen verlichten en zodoende tot een reductie van onveiligheid en discomfort en tot een beter gebruik van de weg kunnen leiden.

### 3. SIMULATIEMODELLEN

#### 3.1. "Definitie" van een simulatiemodel

Het is moeilijk een korte en toch volledige definitie te geven van een simulatiemodel. Zowel aan het woord model als aan simulatie worden nogal verschillende begrippen toegekend.

Een microscopisch simulatiemodel van een verkeersstroom laat zich als volgt omschrijven. De bewegingen van individuele voertuigen worden beschreven, zoals ze geacht worden tot stand te komen onder invloed van kenmerken van voertuigen en bestuurders, interacties van deze elementen onderling en met kenmerken van de weg, omstandigheden (weer, licht) en maatregelen (stat en dynamisch).

Dit proces is in het algemeen zo complex, alleen al t.g.v. het grote aantal invloedsfactoren, dat het niet meer met analytische methoden te hanteren is. De methode die dan praktisch nog overblijft is het nabootsen van het proces met een digitale rekenmachine, wat leidt tot een representatie van een verkeersstroom waaraan men waarnemingen kan doen. Dit laatste centraal stellend is als definitie van simulatie voorgesteld: "een simulatie is een experiment uitgevoerd op een kunstmatig model van een reëel systeem" (Gerlough & Huber, 1975).

#### 3.2. Modelelementen

Bij een simulatiemodel kan men onderscheiden:

- Submodellen voor interacties tussen voertuigen onderling en met overige factoren. Dit zijn dus modellen voor het volg- en strookwisselgedrag, voor het gedrag bij inhalen, in- en uitvoegen, weven en kruisen. Daarnaast zijn modellen nodig voor de invloed van wegkenmerken, omstandigheden en maatregelen (bv. snelheidslimiet, inhaalverbod) op de voertuigbewegingen.

- Invoer (input).

Nodig zijn beschrijving van:

- a) De voertuig-bestuurder populatie

- voertuigkenmerken als afmetingen en capaciteiten

- bestuurderskenmerken als wensnelheid, wensvolgafstand, waarnemingsvermogen, marge bij beslissingen.

b) De wegkenmerken (geometrie), omstandigheden en maatregelen.

c) De rand- en beginvoorwaarden.

Randvoorwaarden zijn de voertuigkenmerken bij binnenkomst van het gemodelleerde gebied (volgtijd, snelheid, rijstrook).

Beginvoorwaarden zijn de kenmerken van de voertuigen die bij het begin van de simulatie in het gebied aanwezig zijn.

Schattingen hiervoor kunnen gebaseerd zijn op vroegere simulaties of op empirische gegevens. Gebruik van beginvoorwaarden kan leiden tot een reductie van de verwerkingstijd. Het alternatief is te beginnen met een leeg gebied dat in de loop van de simulatie gevuld wordt.

- Uitvoer (output).

Wat de voertuigbewegingen betreft is de meest volledige presentatie van het resultaat de verzameling voertuigtrajectoriën. In principe kunnen hier willekeurige andere grootheden uit afgeleid worden. Tot zover is er overeenstemming met de mogelijkheden die bestaan bij een gedetailleerde registratie (bv. met luchtfoto's) van een werkelijke verkeersstroom. Bij een simulatie kunnen echter ook gegevens verzameld worden die bij een reële registratie verborgen blijven, bv. verschillen tussen gewenste en gerealiseerde snelheden.

- Toevalsprocessen.

Zowel bij de begin- en randvoorwaarden als bij de submodellen spelen veelal toevalsprocessen een rol. De verschillen tussen, en ook de inconsistenties van, de voertuig-bestuurdercombinaties worden gemodelleerd door verdelingen, waaruit een of meerdere malen een trekking gedaan wordt. Uitgaande van lotingen uit uniforme verdelingen kunnen in principe lotingen uit willekeurige verdelingen berekend worden en ook kunnen variabelen met voorgeschreven correlatie gegenereerd worden.

In het verleden is het loten wel als het meest essentiële van een simulatie beschouwd, wat heeft geleid tot de term Monte Carlo simulatie.

### 3.3. Activiteiten bij een simulatie

#### - Opstellen model.

Gegeven een specifieke probleemstelling of een meer algemene probleemgebied wordt het model opgesteld. Dit betekent dus een keuze van de situatie (weggeometrie e.d.) en de submodellen.

#### - Programmeren model.

Van belang is een bloksgewijze opbouw van het programma en een rigoureuze verificatie van de goede, d.w.z. bedoelde, werking.

#### - Opzet experiment.

Vele simulatiemodellen zijn zo kostbaar in het gebruik (computertijd en analyse van de resultaten) dat een zorgvuldige opzet van de experimenten er mee geboden is. In principe gelden hiervoor dezelfde proefopzettechnieken als bij gewone experimenten.

#### - Uitvoering experiment.

#### - Validatie.

##### a) Validatie van de submodellen.

In het ideale geval is dit al gebeurd en zijn hoogstens kleine wijzigingen nodig. Praktisch zal men het meestal met slechts zeer beperkt gevalideerde submodellen moeten doen en gaat de keuze tussen expliciet onderzoek van het submodel en impliciete validatie door onderzoek van het totale model.

##### b) Gevoeligheidsanalyse.

Bij het kiezen van de parameterwaarden is een gevoeligheidsanalyse nuttig. Met name kan hiermee bepaald worden welke parameters veel invloed op de criterium variabelen hebben. Dit kan eventueel extra onderzoek beperken en richting geven. Brilon (1977) stelt echter dat een gevoeligheidsanalyse bij de meer complexe modellen zo arbeidsintensief is dat ze slechts beperkt uitvoerbaar is.

##### c) Validatie van het totale model.

Er van uitgaande dat de onderdelen van het model niet volmaakt zijn is het nodig de geldigheid van het totale model te onderzoeken. Uit het doel van de simulatie volgen de variabelen die het model goed moet voorspellen, de zgn. criterium variabelen.

Een eerste stap is na te gaan of de resultaten er redelijk realistisch uitzien. Indien dit positief uitvalt is een vergelijking met een reële situatie nodig. Het model moet dan dezelfde invoer krijgen als in werkelijkheid wordt waargenomen. De gekozen criterium variabelen van beide gevallen kunnen dan vergeleken worden. Een uitwerking van deze methode wordt o.a. gegeven door Gafarian & Walsh (1970).

- Interpretatie van de resultaten.

### 3.4. Globale kenmerken van een simulatiemodel

- Doel van de simulatie
- Geometrische situatie
- Voorkomende submodellen
- Omvang; uit te drukken in:
  - a) weglengte, aangevuld met maten voor de complexiteit van de situatie (bv. aantal in- en uitgangen, aantal kruisingen, aantal rijstroken);
  - b) maximum aantal voertuigen dat tegelijk in het systeem kan zijn;
  - c) benodigde geheugenruimte in het rekentuig.
- Snelheid; uit te drukken in de verhouding verwerkingstijd tot gesimuleerde tijd (snelheid en omvang hangen samen)
- Taal waarin het programma geschreven is.

### 3.5. Een aantal recente modellen

De belangrijkste simulatiemodellen zijn ontwikkeld in de Verenigde Staten, West-Duitsland en Zweden. In het algemeen worden de modellen uit de V.S. gekenmerkt door een streven naar eenvoud en een daarmee overeenstemmend eenvoudig, en grotendeels deterministisch, bestuurdersgedrag. In West-Duitsland is een ontwikkeling gestart waarbij de submodellen voor de interacties tussen de voertuigen juist zeer gedetailleerd zijn. En tenslotte wordt bij het in Zweden ontwikkelde model de nadruk gelegd op het effect van wegkenmerken op de snelheden en wordt een uitgebreide

voertuigcategorisering gebruikt.

Een aantal simulatiemodellen zal kort besproken worden.

A. Verenigde Staten, Tweestrooksweg, Franklin Institute (1969).

Doel: Verkenning van het effect van maatregelen op de verkeerskwaliteit. Bij de maatregelen wordt gedacht aan het vergroten van de zichtlengte en aan extra informatieverstrekking aan de bestuurders ten behoeve van een betere inhaalbeslissing bij voldoende zicht en het mogelijk maken van inhalen bij onvoldoende zicht. Als criteria voor de kwaliteit worden genomen reistijd en veiligheid.

Situatie: Enkelbaansweg met horizontale en verticale bogen, beperkte zichtlengte (geen kruisingen).

Inhaalmodel: De kans op het beginnen van de inhaalmanoeuvre is afhankelijk van de beschikbare ruimte op de andere rijstrook en de snelheid van de ingehaalde voertuigen. Alleen versnellend inhalen wordt gemodelleerd.

Naderen en volgen voorligger: Eenvoudig deterministisch model.

Uitvoer:

- . uitgaande intensiteit
- . gemiddelde en variantie van de snelheden
- . aantal inhaalmanoeuvres, verdeeld in wel en niet afgemaakte
- . extra reistijd van ieder voertuig
- . aantal snelheidswisselingen van ieder voertuig
- . aantal kritische situaties, d.w.z. aantal malen dat inhaalmanoeuvre afgebroken of versneld uitgevoerd moeten worden (het aantal malen dat dit niet meer lukt, een "ongeval", is te gering voor analyse)
- . gemiddelde tijd tot tegenligger na beëindigen van de inhaalmanoeuvre (marge).

De laatste twee grootheden representeren de veiligheid.

Resultaten:

- . Het vergroten van de zichtlengte verbetert de doorstroming en heeft geen effect op de veiligheidsgrootheden.

. Het verstrekken van de exacte snelheid van de zichtbare tegenligger aan de inhalende bestuurders verkleint de variatie bij de inhaalbeslissing. Dit leidt tot een slechtere doorstroming en een verbeterde veiligheid.

. Het verstrekken van de tijd tot de ontmoeting met onzichtbare tegenliggers verbetert de doorstroming en vermindert de veiligheid.

Oordeel:

. Een uitvoerige validatie van het model heeft kennelijk niet plaatsgevonden.

. De validiteit van de veiligheidsgrootheden is onbekend.

B. Verenigde Staten, Rijbaan autosnelweg, Warnshuis (1972).

Doel: Beschrijven van de verkeersstroom op de rijbaan van een autosnelweg, speciaal het ontstaan van congestie.

Situatie: Homogene rijbaan met twee rijstroken, zonder toe- en afritten.

Voertuigen: Onderscheiden worden voertuigen die permanent de linker of rechter rijstrook berijden en wisselaars. Elke soort heeft zijn eigen wenssnelheid, die bij de wisselaars per strook verschilt.

Naderen en volgen voorligger: Bepaald wordt een versnelling, zodanig dat na de snelheidsaanpassing de volgafstand gelijk wordt aan een voorgeschreven waarde die nog lineair afhankelijk is van de snelheid van de voorligger. Ligt deze waarde boven een zekere drempel dan wordt hij gebruikt, waarbij tevens een beperkt versnellingsbereik in acht wordt genomen. De permanente rechter rijstrook berijders vergroten hun volgafstand nog eens extra wanneer de dichtheid, van voertuigen in een gedeelte van de rijstrook voor hen, boven een zekere waarde komt.

Strookwisselen: De wisselaars willen naar links als hun wenssnelheid meer dan een zekere waarde wordt onderschreden en als in de andere rijstrook een hogere snelheid mogelijk is. Ze gaan naar links (sprongsgewijs) als er ruimte is en de nieuwe achterligger als gevolg hiervan niet meer dan een zekere vertraging hoeft op te brengen. De wisselaars willen altijd naar rechts en voeren de wisseling uit als er ruimte is en ze zelf,



noch de nieuwe achterligger, hierdoor gedwongen worden meer dan een zekere vertraging op te brengen.

Validatie: Slechts de basisdiagrammen zijn globaal vergeleken met data.

Oordeel: De interactiemodellen zijn nogal eenvoudig en de variatie van de voertuig-bestuurderskenmerken is gering. Validatie is nog maar beperkt uitgevoerd op een globaal criterium. In feite is dit model echter een exemplaar uit een ontwikkelingsreeks die naar steeds complexere modellen leidt.

C. West-Duitsland, Tweestrooksweg, Brilon (1977).

Doel: Beschrijven van de wisselwerking tussen de verkeersstromen in beide richtingen op een enkelbaans tweestrooksweg waarbij het effect van vrachtverkeer opgenomen moet worden. Toepassingen van het model liggen op het gebied van richtlijnen en voorspelling van de verkeerskwaliteit.

Situatie: Homogene weg (geen bogen, zichtbeperkingen en kruisingen).

Volgmodel: Dit is zeer gedetailleerd en vrijwel identiek aan het in paragraaf 2.1.2. behandelde model 7.

Inhaalmodel: Bestuurders willen inhalen als hun snelheid kleiner is dan hun wenssnelheid minus een met de intensiteit toenemende marge. De marge is bovendien bestuurdersafhankelijk.

Bestuurders gaan inhalen als:

- . de voorligger niet wil inhalen;
- . niet meer dan vier voertuigen tegelijk moeten worden ingehaald;
- . er voldoende invoegruijnte is voor terugkeer in de eigen rijstrook;
- . de loting volgens de gap-acceptance functie positief uitvalt; de acceptatiefunctie is een verschoven lognormale verdeling met de afstand tot de tegenligger als argument en met parameters die afhangen van de bestuurder en de snelheid van het ingehaalde voertuig;
- . de inhaalruimte kinematisch gezien voldoende is; daarbij wordt o.a. rekening gehouden met het versnellend vermogen van de inhaler en de snelheid van de tegenligger.

Voertuigen: Er worden drie voertuigklassen onderscheiden, ieder met een vaste lengte van 4,5, 8 en 15 m. Binnen de klassen zijn de grenzen van het versnellingsbereik nog verdeeld.

Bestuurders: Een groot aantal kenmerken wordt via lotingen uit verdelingen aan bestuurders toegekend. Het betreft ondermeer: de wenssnelheid, risicoparameter, perceptiedrempels, benutting van beschikbare versnelling, doseringsparameter. Per bestuurder/voertuig worden de kenmerken een maal geloot. Sommige kenmerken krijgen bij het gebruik nog een extra stochastische toevoeging als modellering van niet volledig consistent gedrag.

Uitvoer: De voertuigtrajectoriën, waaruit in eerste instantie slechts het basisdiagram, de verdeling van de reistijden en het aantal inhaalmanoeuvres worden afgeleid.

Validatie: Heeft in feite nog nauwelijks plaatsgevonden.

Oordeel: Wat betreft de modellering van voertuiginteracties is het model zeer gedetailleerd. Of dit nodig is voor de toepassing is vooralsnog onduidelijk. Een goede validatie ontbreekt nog.

Opm. Hoewel het model opgesteld is met het doel een veilige verkeersafwikkeling te simuleren treden toch "ongewild" soms ongevallen op. Volgens de auteurs is het echter niet juist hier reële betekenis aan te hechten.

#### D. West-Duitsland, Rijbaan autosnelweg, Wiedemann (1976).

Doel: Beschrijven van de verkeersstroom in de omgeving van een flessehals en voorspellen van de toestand in de flessehals op grond van verkeersstroomkenmerken die eerder en meer stroomopwaarts optreden.

Situatie: Tweestrooks rijbaan met helling.

Volgmodel: Vermoedelijk zeer gedetailleerd en overeenstemmend met het in paragraaf 2.1.2. behandelde model 7.

Strookwisselmodel: Hierover ontbreken gegevens. Verwacht mag worden dat het in overeenstemming met het volgmodel, nogal gedetailleerd zal zijn.

Interactie met wegkenmerken: De snelheid van de vrachtauto's wordt begrensd door het verticaal profiel. Dit is in feite de oorzaak van de flessehals.

Voertuigen: Onderscheiden worden personen- en vrachtauto's. De laatste categorie vermoedelijk nog verder verdeeld en voorzien van een vermogen/gewichtsverdeling.

Bestuurders: Evenals in het voorgaande model worden een groot aantal kenmerken door lotingen aan de bestuurders toegekend.

Uitvoer: Macroscopische kenmerken als intensiteit, dichtheid, gemiddelde snelheid, verdeling over de rijstroken en aantal strookwisselingen. Mesoscopische kenmerken als snelheids- en volgtijdverdelingen.

Validatie: Deze is nog nauwelijks uitgevoerd. Gesteld wordt dat vooral de verdeling van de voertuigen over de rijstroken en het aantal strookwisselingen geschikte criteria zijn voor vergelijking van model met realiteit.

Oordeel: Voor wat betreft de voertuiginteracties is het model vermoedelijk van eenzelfde mate van gedetailleerdheid als het West-Duitse model voor een tweestrooksweg. Ook in dit geval is het onduidelijk of dit nodig is voor de toepassingen en ontbreekt de validatie nog.

Toepassing: Het model is toegepast bij het ontwerp van een signaleringssysteem op een lange steile helling in de autosnelweg Stuttgart-München. Het systeem vertoont grote overeenkomst met het Nederlandse "Plaatselijke Signaleringsysteem" en is inmiddels in bedrijf (zie onder Industrie-Berichte in Strassenverkehrstechnik nr 3, 1976).

#### E. Zweden, Tweestrooksweg, Gynnerstedt (1976).

Doel: Voorspellen verkeerskwaliteit op grond wegkenmerken en verkeersaanbod t.b.v. beleid m.b.t. wegeaanleg en verbeteringen. Voorspellen effect van specifieke maatregelen als bv. kruipstroken.

Situatie: Weg met variabel profiel (dwars, horizontaal en verticaal), zichtlengte en snelheidslimiet, echter zonder kruisingen.

Model voor vrij rijden: De voertuigen hebben per categorie een wenssnelheidsverdeling. De wenssnelheid wordt eventueel gereduceerd t.g.v. dwars, horizontaal en verticaal profiel, snelheidslimiet en vermogen-gewichtsverhouding.

Volgmodel: Dit wordt niet behandeld in de beschikbare bron maar is vermoedelijk weinig gedetailleerd.

Inhaalmodel: Zowel vliegend als versnellend inhalen zijn gemodelleerd. De kans op een positieve inhaalbeslissing is afhankelijk van de afstand tot de tegenligger, de zichtlengte en de wegbreedte.

Voertuigen: Er zijn één personenauto- en drie vrachtautocategorieën, ieder met een eigen verdeling van vermogen-gewichtsverhouding en wenssnelheid.

Uitvoer: O.a. reistijden en aantal inhaalmanoeuvres.

Validatie: Een uitvoerige validatie van het model is in uitvoering. Vergelijkingscriteria zijn reistijden en aantal inhaalmanoeuvres, uitgesplitst naar voertuigcategorie en wenssnelheid. Gesteld wordt dat het een probleem is te bepalen wanneer een model voldoende geldig is.

Toepassingen: Behalve de onder doel genoemde toepassingen wordt ook gedacht aan gebruik bij verkeersveiligheidsonderzoek. Simulatie van de verkeersstroom bij en in de omgeving van gedetecteerde black spots zou meer inzicht kunnen bieden in de ongevals-oorzaken en bruikbaar zijn bij indicatie en voorspelling van het effect van maatregelen.

### 3.6. Toepassingen

In principe zijn simulatiemodellen bij veel verkeersproblemen bruikbaar. In het volgende worden hiervan een aantal voorbeelden genoemd. Ten dele zijn deze ook al ter sprake gekomen in de paragraaf over recente modellen. Volledigheidshalve zijn ook een aantal toepassingen opgenomen van modellen die zowel verkeer op aders als kruisingen beschrijven.

#### - Verkeersbeheersing met signaleringssystemen

Binnen dit gebied is een indeling naar situatie gemaakt.

. Aders van autosnelwegen

Ontwerp van automatische incident detectie algoritmen; Mikhalkin (1971) en Wiedemann (1976).

Ontwerp van toeritdoseringsregelingen (ramp control); Buhr et al (1968) en Salter & El-Hanna (1976).

. Aansluiting autosnelweg met niet-autosnelweg

Ontwerp van de verkeerslichtenregeling voor een aansluiting van het type "Haarlemmermeer"; Torres (1973).

. Netwerk van stedelijke hoofdwegen

Ontwerp van gecoördineerde verkeerslichtenregelingen; Wiedemann (1969), Liebermann (1972) en Davies (1974).

. Corridor (samenhangend netwerk van autosnelwegen en stedelijke hoofdwegen)

Ontwerp van de regeling; Liebermann (1972), Davies et al (1974).

#### - Wegontwerp

. Bepalen van verkeersindicatoren, vooral betreffende het afwikkelingsaspect, op tweestrookswegen t.b.v. algemeen ontwerpbeleid; Gynnerstedt (1976).

. Bepalen van de capaciteit en het afwikkelingsniveau op tweestrookswegen in afhankelijkheid van verticaal profiel en voertuig-samenstelling; St. John (1975) en Stock & May (1975).

. Bepalen van het afwikkelingsniveau op autosnelwegen met lange hellingen in afhankelijkheid van vrachtverkeer; St. John & Glauz (1975).

. Bepalen effect van configuratie van dicht stelsel van toegen afritten op de verkeersafwikkeling; Leland & Coleman (1970).

. Bepalen effect van de geometrie van een uitvoegstrook op de verkeersafwikkeling; Storost (1971).

. Bepalen effect geometrische varianten van een "Haarlemmermeer" aansluiting; Torres (1973). Dit in samenhang met het eerdergenoemde ontwerp van de bijbehorende verkeerslichtenregeling.

. Indicatie en ontwerp, d.w.z. de plaats van kruipstroken op tweestrookswegen; Gynnerstedt (1976).

#### - Hulpmiddelen

Voorspelling van het effect van extra informatieverschaffing aan de bestuurders bij de inhaalmanoeuvre op tweestrookswegen; Franklin Institute (1969).

### 3.7. Relatie met verkeersveiligheidsonderzoek

#### Algemeen

De simulatiemodellen leveren een bijdrage tot de algemene kennis van het verkeersproces, die in principe te gebruiken is bij een deel van het verkeersveiligheidsonderzoek. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van de modellen bij het ontwerpen van signaleringssystemen, die onder meer ten doel hebben de verkeersveiligheid te bevorderen.

#### Aspectenonderzoek

Bij het treffen van veiligheidsmaatregelen treden veelal neven-effecten op. Voorspelling hiervan kan soms met behulp van simulatiemodellen uitgevoerd worden. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is het bepalen van het effect van inhaalverboden op reistijden.

#### Gesimulcerde ongevallen

Een ongeval kan beschreven worden in termen van voertuigbewegingen en micro-simulatiemodellen gaan over voertuigbewegingen. Het ligt dus voor de hand te vragen of ongevallen, tot aan het moment van botsen, in de modellen opgenomen kunnen worden.

Bij de meer complexe modellen, met de vele variabelen die geloot worden uit verdelingen, kan de kans dat er volgens het model een ongeval optreedt ongelijk aan nul zijn. De ongevallenkans is in het algemeen niet direct uit de modelbeschrijving en de invoergegevens af te leiden, maar kan alleen door het uitvoeren van de simulatie bepaald worden. De vraag is of de zo gegenereerde ongevallen een reële betekenis hebben. Hier tegen pleiten de volgende overwegingen:

- De bestaande modellen zijn nog vrij sterk geschematiseerd voor wat betreft de laterale bewegingscomponent. De onderlinge afhankelijkheid van de diverse variabelen, bv. de bestuurderskenmerken, zijn door gebrek aan gegevens nog zeer onvolledig in model gebracht.

- Meer principieel is de vraag of het model nog wel geldig is in kritische situaties. Het is meestal opgesteld en wordt gecalibreerd met gegevens uit niet kritische situaties. De staarten van de verdelingen zorgen er voor dat er toch ongevallen kunnen optreden, maar juist aan de validiteit van de staarten kan getwijfeld worden. Eventuele principiële gedragsveranderingen in kritische situaties van de betrokken bestuurders, bv. snelheid verminderen van een tegenligger en naar rechts uitwijken van een ingehaald voertuig bij een inhaalmanoeuvre op een tweestrooksweg, zijn moeilijk in een te valideren model op te nemen.

- Een praktisch bezwaar is het volgende. Stel dat een model de ongevallen realistisch weergeeft, dan betekent dit dat de ongevallen even zeldzaam zijn geworden als in de werkelijkheid. Omdat verwacht mag worden dat zo'n model complex is en bijbehorende lange verwerkingstijd heeft (bv. simulatie en reële tijd van dezelfde orde), betekent dit dat voor een behoorlijk aantal ongevallen zeer lange simulaties nodig zijn. Een voordeel van de simulatie blijft dan nog wel dat men meer gecontroleerde ongevallenstudies kan uitvoeren dan in de praktijk. Bovendien zou men uitsluitend de korte voorgeschiedenissen van de ongevallen kunnen analyseren.

Gezien het bovenstaande mag aangenomen worden dat de met een simulatiemodel gegenereerde ongevallen, zolang het tegendeel niet aangetoond is, geen directe reële betekenis hebben.

#### Gesimuleerde conflicten

In plaats van ongevallen kan men met simulatiemodellen frequenter optredende gebeurtenissen bepalen die mogelijk in relatie staan tot ongevallen. Zo is wel eens voorgesteld voor de verkeersstroom op een tweestrooksweg aan elkaar te relateren de aantallen: inhaalmanoeuvres en inhaalongevallen, ontmoetingen met tegenliggers en frontale botsingen, voertuigkilometers en ongevallen waar slechts een voertuig bij betrokken is; Gustavsson (1971). Het lijkt echter beter de gebeurtenissen wat specifiekere te ne-

men, zoals met simulatiemodellen mogelijk is. Zo is, bij het in par. 3.5. behandelde model van het Franklin Instituut, het aantal afgebroken of versneld uitgevoerde inhaalmanoeuvres bepaald. Verder zijn de inhaalmanoeuvres gekenmerkt door hun verschillende **mar-**  
**ge**, d.w.z. afstand tot de tegenligger, aan het eind van de manoeuvre. Ook het aantal malen, dat met meer dan een zekere vertraging geremd wordt, lijkt een geschikte grootheid. Men kan dit alles beschouwen als een vorm van conflictregistratie en vervolgens onderzoeken of er een relatie bestaat tussen conflicten en ongevallen. Het doel is dan het aantal ongevallen uit de conflicten te voorspellen. Hiervoor is nodig dat het model de conflicten goed voorspelt en het verifiëren daarvan is niet eenvoudig. De kans op succes van deze procedure wordt echter groter geacht dan bij de gesimuleerde ongevallen omdat de conflicten minder eisen stellen aan de precisie en mate van detail van het model.



#### 4. SLOTBESCHOUWING

##### 4.1. Volgmodellen

- De manoeuvre volgen is een essentieel onderdeel van de beschrijving van een verkeersstroom. Naarmate de benuttingsgraad van de wegen (intensiteit-capaciteitsverhouding) toeneemt wordt het belang van de volgmanoeuvre groter omdat hij meer voorkomt.
- De theoretische modelontwikkeling heeft geleid tot een groot aantal modellen, die echter nog te weinig getoetst zijn. Nodig is verder onderzoek van de perceptiemogelijkheden van de mens (dit gebeurt o.a. in het SWOV-project Analyse Rijtaak) en veldonderzoek naar wat in reëel verkeer voorkomt. Voor het laatste dient eerst een minder kostbare meetmethode te worden ontwikkeld dan de nu beschikbare.
- De belangrijkste toepassingen van volgmodellen zijn:
  - . inpassing in een meer volledig verkeersstroommodel;
  - . gebruik bij indicatie, ontwikkeling en evaluatie van hulpmiddelen voor bestuurders bij de rijtaak, met name bij perceptie, beslissing en voertuigbediening.

##### 4.2. Inhaal- en strookwisselmodellen

- Inhalen en strookwisselen vormen een even essentieel onderdeel van de beschrijving van een verkeersstroom als volgen. Met stijgende benuttingsgraad wordt in eerste instantie de frequentie van deze manoeuvres en dus het belang ervan groter. Vanaf een zekere benuttingsgraad daalt de frequentie weer, echter de manoeuvres worden dan in het algemeen riskanter en blijven daarom van belang, zowel voor verkeersafwikkeling als veiligheid.
- De manoeuvres inhalen en strookwisselen lenen zich goed voor een analyse in termen van benodigde en beschikbare ruimte, een perceptie- en beslissingsproces. Ook in dit geval zijn nog meer gegevens nodig, zowel over de perceptiemogelijkheden van de mens (Analyse Rijtaak) als over wat voorkomt in reëel ver-

keer. Voor wat betreft het laatste is de situatie met betrekking tot de instrumentatie gunstiger dan bij de volgmodellen.

- De toepassing van inhaal- en strookwisselmodellen ligt vooral in de bijdrage tot een meer volledig verkeersstroombelastingmodel.

#### 4.3. Simulatiemodellen

##### Toepassingen

- De modellen zijn bruikbaar bij de analyse van maatregelen die effect hebben op kenmerken van de verkeersstroom, zowel op macroscopisch, mesoscopisch als microscopisch niveau. Kwaliteitsaspecten van de verkeersstroom die uit deze kenmerken volgen zijn er dus mee te beschrijven en te voorspellen. Voor afwikkelingsaspecten van de verkeersstroom is de procedure relatief eenvoudig. Voor veiligheidsaspecten geldt dat niet omdat de relatie tussen verkeersstroomkenmerken en onveiligheid maar zeer beperkt bekend is.

- In principe kunnen de modellen ongevallen, d.w.z. botsingen, genereren. Voorlopig wordt aangenomen dat dit weinig reële betekenis heeft omdat de modellen daarvoor nog niet voldoende ver ontwikkeld zijn. Wel kunnen de modellen conflicten (nader te definiëren gebeurtenissen die verondersteld worden met ongevallen in relatie te staan) voorspellen, en die op hun beurt ongevallen. Deze potentiële toepassing lijkt in eerste instantie geïndiceerd voor situaties waar de conflicten moeilijk te observeren zijn; dus bv. eerder op aders dan op kruispunten.

##### Validatie

In het algemeen is de validatie van de modellen of (nog) niet of slechts zeer beperkt uitgevoerd. Dit zal ten dele samenhangen met de grote inspanningen die nodig zijn voor het verzamelen van geschikte data. Soms krijgt men echter de indruk dat het belang van een goede validatie niet ten volle beseft wordt.

### Relatie met andere verkeersstroommodellen

- Vergelijken met analytische modellen kunnen de simulatiemodellen meer complexe processen beschrijven, zijn ze doorzichtiger van structuur en meer flexibel bij gebruik. Hun ontwikkeling en gebruik vereist echter meer middelen en de relatie tussen in- en output is ondoorzichtiger.

- Opgeloste analytische modellen kunnen bruikbaar zijn bij de ontwikkeling van een simulatiemodel, bv. voor controle van de goede werking van bepaalde programma-onderdelen.

- In een vorig deel van het rapport is opgemerkt dat een microscopisch model bruikbaar kan zijn bij de validatie van mesoscopische en macroscopische modellen. Men kan ook microscopische modellen gebruiken om daar uit direct de meer globale modellen af te leiden. Tot nu toe wordt dit vooral voor het basisdiagram gedaan.

### Kosten

- Vooral de meer complexe modellen zijn kostbaar in ontwikkeling, met name als daarbij een goede validatie met reële verkeersstroomdata wordt gerekend. Ook de kosten van het gebruik van de modellen zijn niet gering en krijgen veel nadruk, wellicht vooral omdat de direct zichtbare computerkosten hoog zijn. Vergeleken met veldonderzoek dat dezelfde gegevens oplevert is een simulatie echter goedkoop, ook al is het model complex en vergt het veel rekentijd. In feite zouden de kosten van het model afgewogen moeten worden tegen de baten die het oplevert, echter de laatste zijn meestal moeilijk te kwantificeren.

- Voor concrete problemen moet steeds getracht worden de minimaal benodigde detaillering van het model te bepalen. Immers hoe eenvoudiger het model, voor wat betreft het aantal factoren en het aantal en de complexiteit van de submodellen, hoe geringer de ontwikkelings-, bedrijfs- en interpretatiekosten. Ideaal is een "blokkendoos" met allerlei meer en minder gedetailleerde submodellen, in- en uitvoerroutines e.d., die in een willekeurige combinatie tot een geheel samengesteld kunnen worden.

- Een andere oplossing voor het beperken van de kosten biedt de zogenaamde "repro-modelling" techniek; zie Meisel & Collins (1973). Uitgaande van een complex model, dat voor veelvuldig gebruik te kostbaar is, wordt voor een bepaald probleem een vereenvoudigd model opgesteld. Dit komt tot stand door directe en relatief eenvoudige relaties op te stellen tussen de relevante in- en uitvoer-variabelen door middel van waarnemingen aan het model. Hiermee is dan het complexe model gereduceerd tot een black box. Het is nu betrekkelijk eenvoudig bepaalde optimale gebieden te vinden, waarvan de details zonodig met behulp van het oorspronkelijke model bestudeerd kunnen worden.

#### Diversen

- Het effect van omstandigheden, d.w.z. van factoren als duisternis, nat wegdek e.d., is tot nu toe niet in de modellen opgenomen.

## AFBEELDINGEN

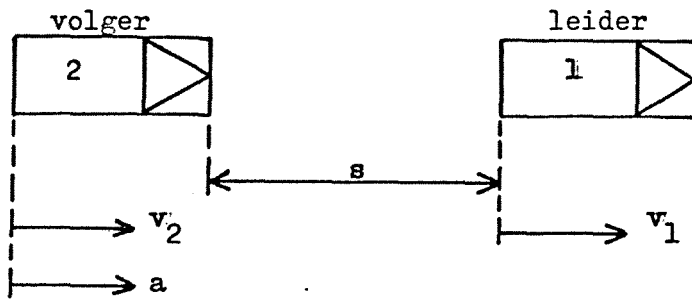
### Nr.    Bijschrift

- 1        Notatie bij de volgmodellen.
- 2        Gebied van mogelijke versnellingen. Bron: Lewis (1970).
- 3        Schematische voorstelling volggedrag in  $v_r, s$  vlak. Model met vaste perceptiedrempels en zonder responsietijd. Bron: Leutzbach (1972).
- 4        Schematische voorstelling volggedrag in  $v_r, s$  vlak. Model met variabele perceptiedrempels en responsietijd. Bron: Leutzbach (1972).
- 5        Drempels in het  $v_r, s$  vlak bij het simulatiemodel voor het volgen. Bron: Wiedemann (1974).
- 6a       Gesimuleerd volggedrag van twee voertuigen. Bron: Wiedemann (1974).
- 6b       Gemeten volggedrag. Bron: Hoefs (1972).
- 7        Effect van voertuiglengte op congestie. Bron: McClenahan (1969).
- 8        Benodigde afstand tot tegenligger ( $c_s$ ) bij vliegend inhalen in afhankelijkheid van de snelheid van inhaler ( $v_a$ ) en ingehaalde ( $v_p$ ). Bron: Brilon (1974).
- 9        Benodigde afstand tot tegenligger ( $c_s$ ) bij versnellend inhalen in afhankelijkheid van de snelheid van de ingehaalde ( $v_p$ ), het voertuigtype, de maximum snelheid ( $v_m$ ) en de snelheid van de tegenligger ( $v_t$ ). Bron: Brilon (1974).

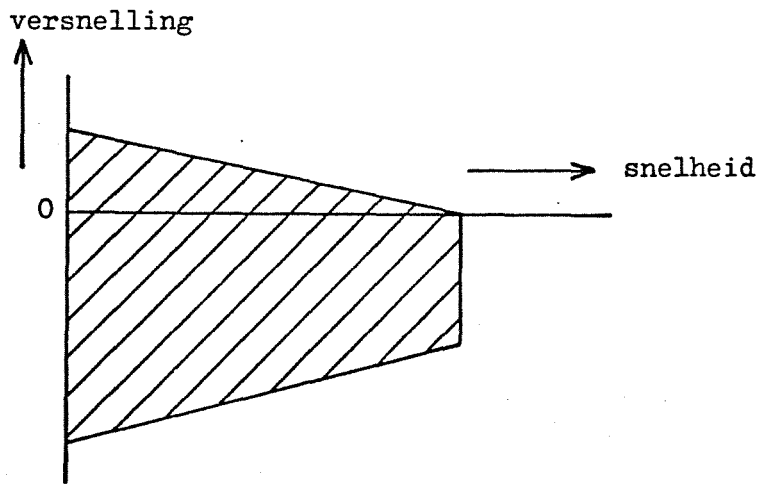
Nr.    Bijschrift

10    Voorbeeld van een gap-acceptance functie.

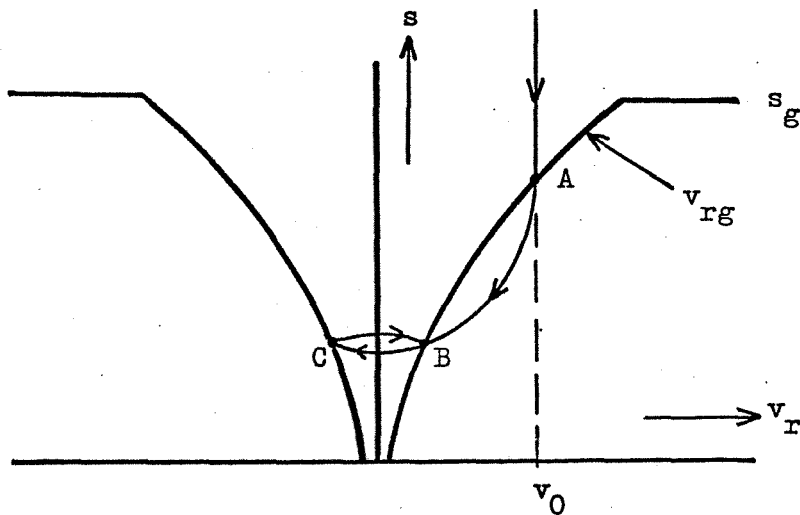
11    Definitie van voorgap en achtergap. Bron: Worrall & Bullen  
(1970).



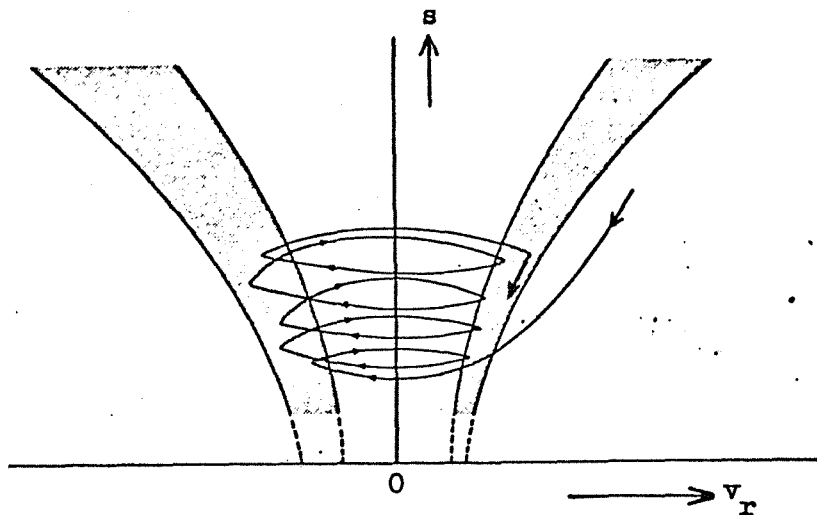
Afbeelding 1. Notatie bij de volgmodellen.



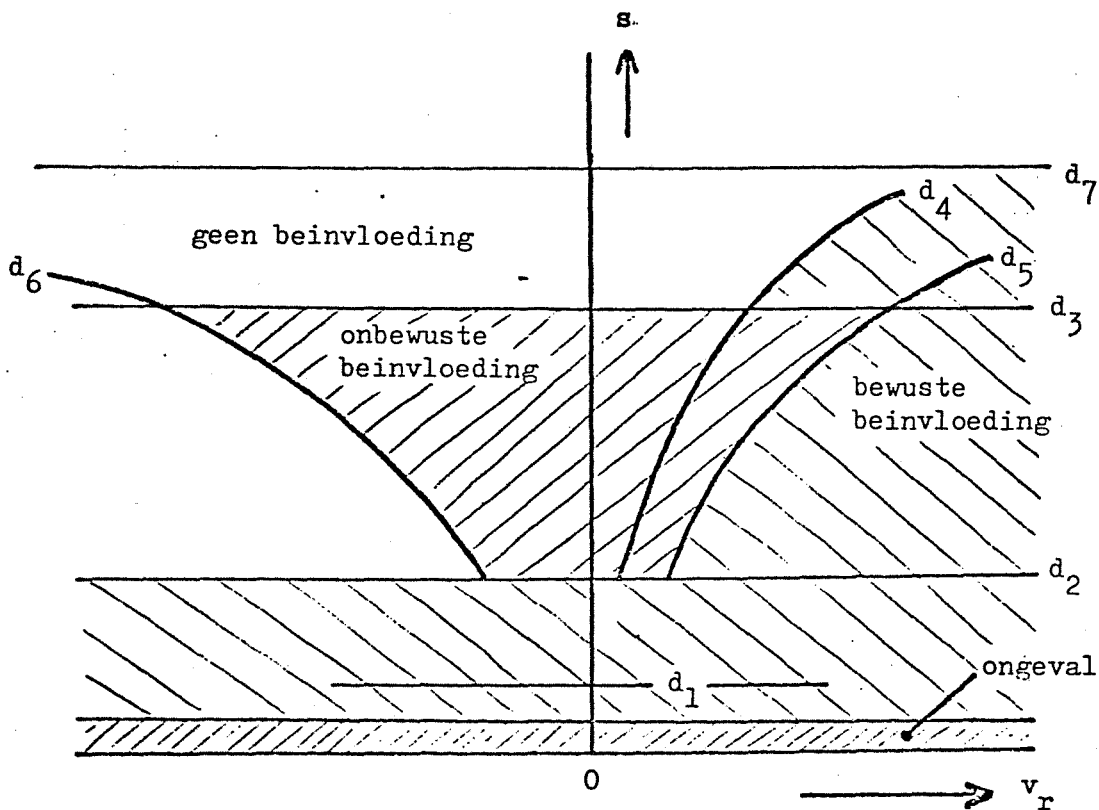
Afbeelding 2. Gebied van mogelijke versnellingen. Bron: Lewis (1970).



Afbeelding 3. Schematische voorstelling volgedrag in  $v_r, s$  vlak. Model met vaste perceptiedrempels en zonder responsietijd. Bron: Leutzbach (1972).

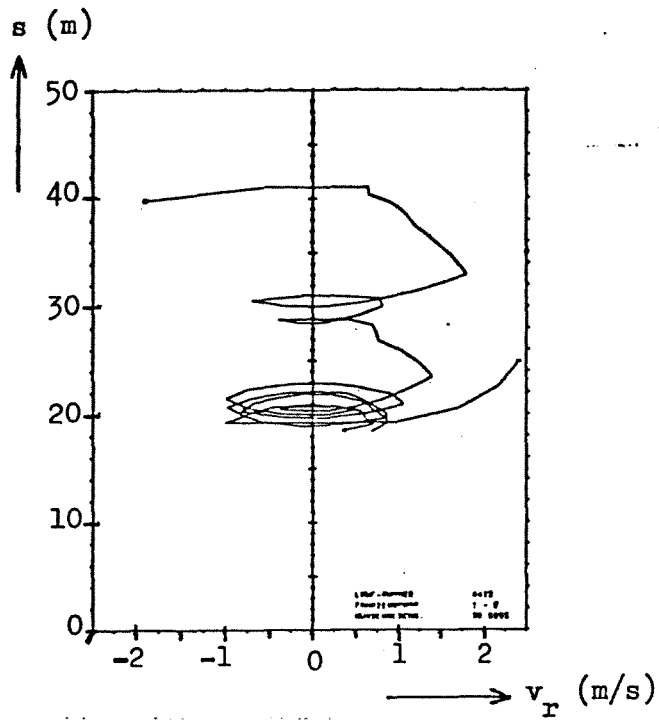


Afbeelding 4. Schematische voorstelling volggedrag in  $v_r, s$  vlak. Model met variabele perceptiedrempels en responsietijd. Bron: Leutzbach (1972).

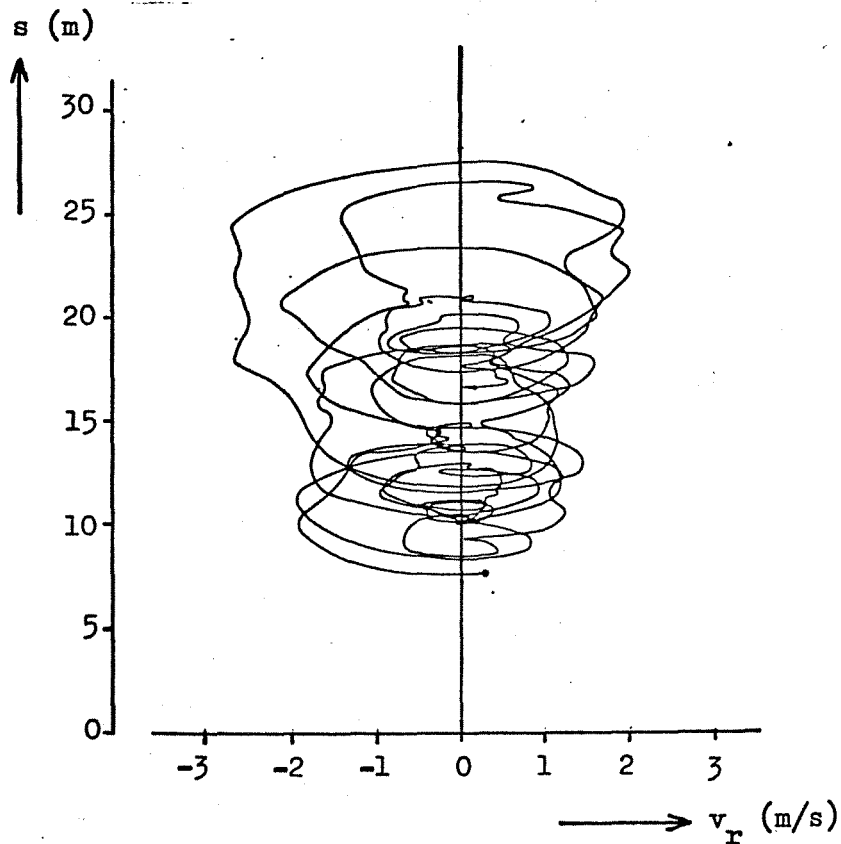


Afbeelding 5. Drempels in het  $v_r, s$  vlak bij het simulatiemodel voor het volgen. Bron: Wiedemann (1974).

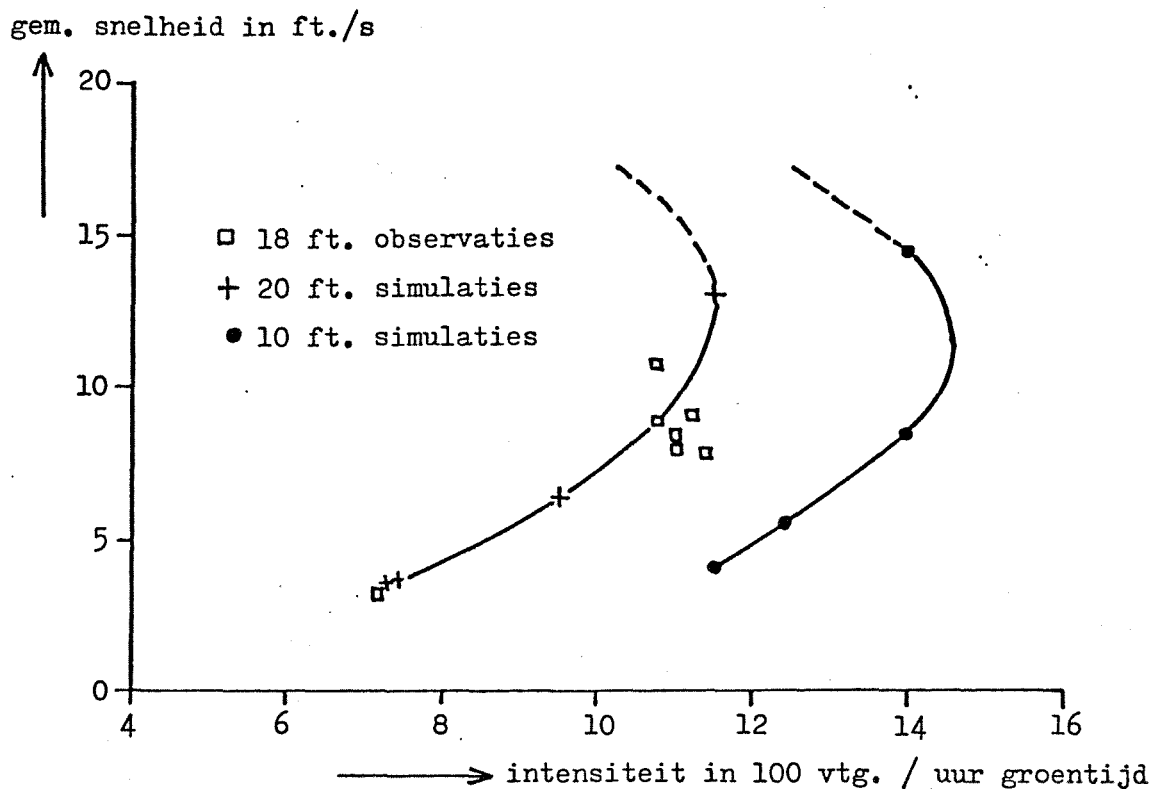




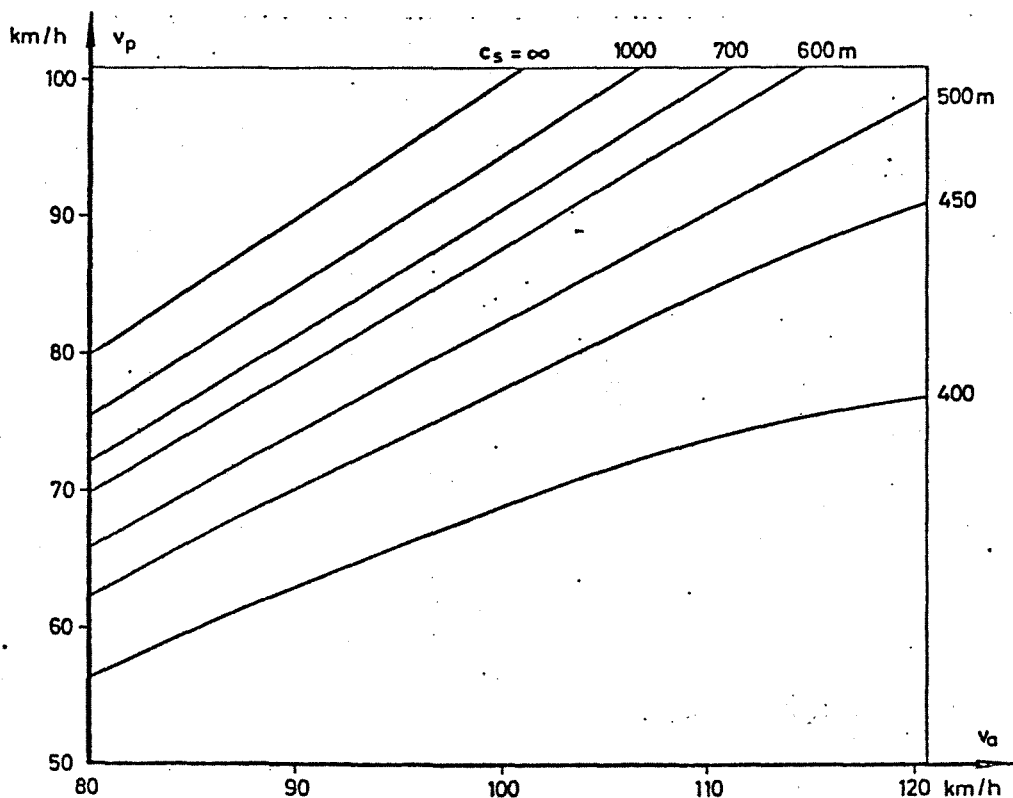
Afbeelding 6a. Gesimuleerd volggedrag van twee voertuigen.  
Bron: Wiedemann (1974).



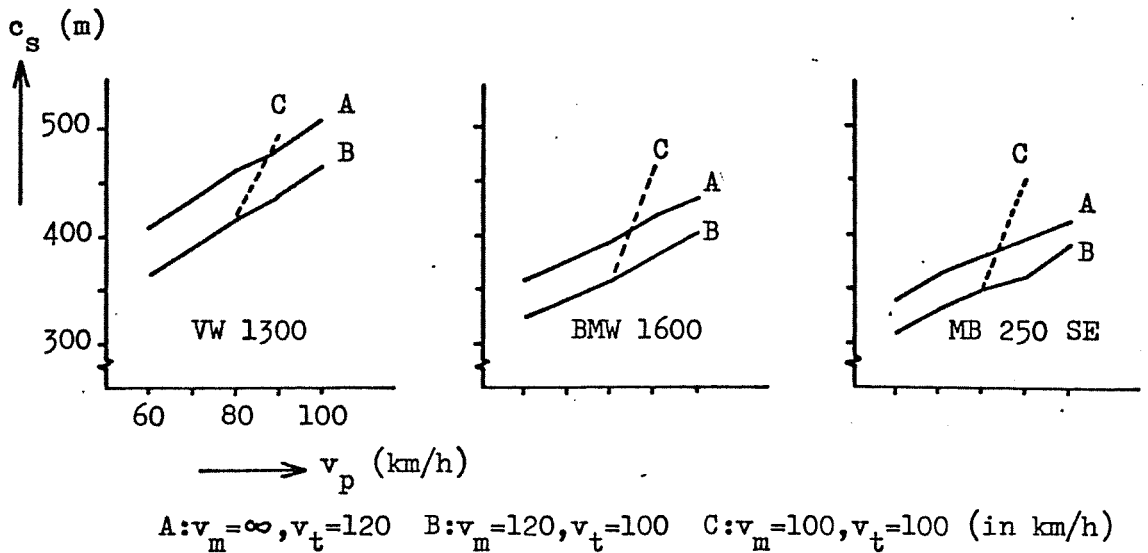
Afbeelding 6b. Gemeten volggedrag. Bron: Hoefs (1972).



Afbeelding 7. Effect van voertuiglengte op congestie. Bron: McClenahan (1969).

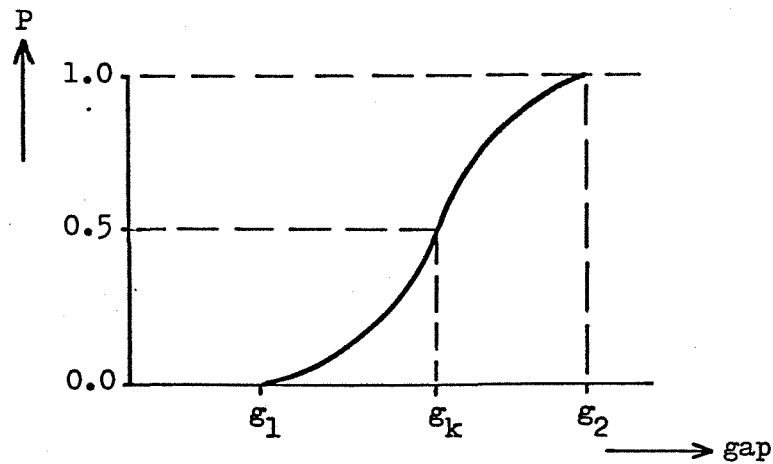


Afbeelding 8. Benodigde afstand tot tegenligger ( $c_s$ ) bij vliegend inhalen in afhankelijkheid van de snelheid van inhaler ( $v_a$ ) en ingehaalde ( $v_p$ ).  
Bron: Brilon (1974).

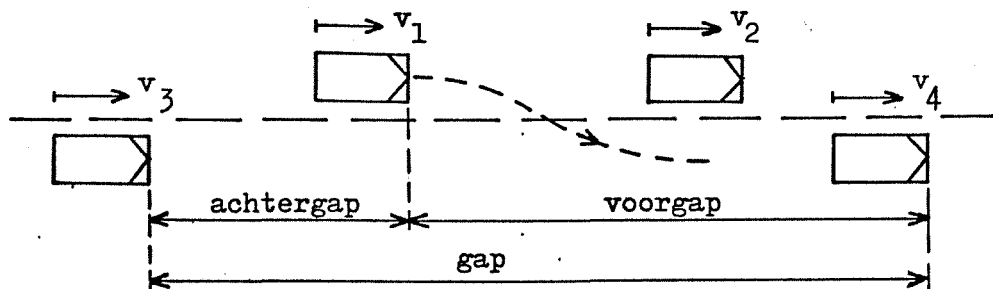


Afbeelding 9. Benodigde afstand tot tegenligger ( $c_s$ ) bij versnellend inhalen in afhankelijkheid van de snelheid van de ingehaalde ( $v_p$ ), het voertuigtype, de maximum snelheid ( $v_m$ ) en de snelheid van de tegenligger ( $v_t$ ).

Bron: Brilon (1974).



Afbeelding 10. Voorbeeld van een gap-acceptance functie.



Afbeelding 11. Definitie van voorgap en achtergap. Bron: Worrall&Bullen(1970).

## LITERATUUR

Bexelius, S. An extended model for car-following. *Transportation Research* 2 (1968) 1:15-21.

Botma, H. Instrumentatieproblemen bij car-following onderzoek. SWOV, 1974, Voorburg.

Brilon, W. Warteschlangermodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstrassen. Technische Univ., Karlsruhe, 1974.

Brilon, W. Erstellung eines Simulationsmodells für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Strassen mit Gegenverkehr. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* 239. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1977.

Buhr, J.H., Meserole, T.C., Drew, D.R. A digital simulation program of a section of freeway with entrance and exit ramps. *Highway Research Record* 230. Highway Research Board, Washington, 1968.

Ceder, A. A deterministic traffic flow model for the two-regime approach. Univ. of Cal., Berkeley, 1974 (T.R.B. meeting '75).

Chandler, R.E., Herman, R., Montroll, E.W. Traffic dynamics: studies in car-following. *Operations Research* 6 (1958) 2:165-184.

Davies, G.W., Grecco, W.L., Heathington, K.W. A generalized street network simulation model. *Transportation Research Record* 509. Transportation Research Board, Washington, 1974.

Fenton, R.E. & Rule, R.G. On the effect of state variable feedback on driver-vehicle behaviour in car-following. In: *Papers of Int. Symp. on psychological aspects of driver behaviour*. SWOV, Voorburg, 1971.

Fox, Ph. & Lehman, F.G. Safety in car-following, a computer simulation. Newark College of Engineering, Newark, 1967 (geschat).

Franklin Institute. Identification and evaluation of remedial aid systems for passing manoeuvres on two-lane rural roads. Franklin Institute, Philadelphia, 1969.

Gafarian, A.V. & Walsh, J.E. Methods for statistical validation of a simulation model for freeway traffic near an on-ramp. Transportation Research 4 (1970) 4:379-384.

Gerlough, D.L. & Huber, M.J. Traffic flow theory (chapter 9) Special Report 165. Transportation Research Board, Washington, 1975.

Gordon, D.A. The driver in single lane traffic. Highway Research Record 349. Highway Research Board, Washington, 1971.

Griep, D.G. Analyse van de rijtaak. Besliskundige aspecten van het manoeuvregedrag. Verkeerstechniek 22 (1971) 8:423-427.

Gustavsson, J. On the frequency of accidents of different types. Accident analysis and prevention 3 (1971) 2:95-112.

Gynnerstedt, G. Traffic simulation on two-lane rural roads - geometric design policy. In: Papers of Symp. on geometric road design standards. OECD, Paris, 1976.

Herman, R. & Potts, R.B. Single lane traffic, theory and experiment. In: Herman, R. (ed). Theory of traffic flow. Proc. Symp. on the theory of traffic flow. Elsevier, Amsterdam, 1961.

Herman, R. & Rothery, R.W. Car-following and steady-state flow. In: Almond, J. (ed). Proc. II Int. Symp. on the theory of road traffic flow. OECD, Paris, 1965.

Herman, R., Lam, R., Rothery, R. Further studies on single-lane bus flow: Transient characteristics. Transportation Science 4 (1970) 2:187-216.

Hoefs, D.H. Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 140. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1972.

Irving, A. Some driving aids and their assessments. In: Papers of Int. Symp. on psychological aspects of driver behaviour. SWOV, Voorburg, 1971.

Janssen, W.H. De perceptie van de voorligger bij het nachrijden. Verkeerstechniek 25 (1974) 12:622-627.

Köhler, U. Stabilität von Fahrzeugkolonnen. Institut für Verkehrswesen. Technische Univ., Karlsruhe, 1974.

Leland, S. & Coleman, F.E. A general traffic flow simulation model for freeway operation. In: Proc. National Conference of the committee on computer technology, Albany, 1970.

Leutzbach, W. Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer, Berlin, 1972.

Lewis, P.A. Driver behaviour equations: Some limits on their solution due to vehicle dynamics. Traffic Engineering and Control 12 (1970) 8:414-416.

Lieberman, E.B. Simulation of corridor traffic; the SCOT model. Highway Research Record 409. Highway Research Board, Washington, 1972.

McClenahan, J.W. & Simkowitz, H.J. The effect of short cars on flow and speed in down-town traffic: A simulation model and some results. Transportation Science 3 (1969) 2:126-139.

Meisel, W.S. & Collins, D.C. Repro-modelling: an approach to efficient model utilization and interpretation. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC 3 (1973) 4:349-358.

Mikhalkin, B. Estimation of roadway behaviour using occupancy detectors. Univ. of Southern Cal., 1971 (Diss.).

Miller, A.J. Nine estimators of gap-acceptance parameters. Univ. of Melbourne, Melbourne, 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.

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.

Payne, H.J. Models of freeway traffic and control. Simulation council proc. Mathematical models of public systems, 1, Nr. 1, 1971.

Roszbach, R. Some problems in the design of improved vehicle rear-lighting configurations. In: Papers of Int. Symp. on psychological aspects of driver behaviour. SWOV, Voorburg, 1971.

Salter, R.J. & El-Hanna, F.I.H. Highway ramp merging examined by simulation. Australian Road Research 6 (1976) 2:30-39.

St. John, A.D. Nonlinear truck factor for two-lane highways. Midwest Research Institute, Kansas City, 1975 (T.R.B. Meeting 1976).

St. John, A.D. & Glauz, W.D. Speeds and service on multilane upgrades. Midwest Research Institute, Kansas City, 1975 (T.R.B. meeting 1976).

Stock, W.A. & May, A.D. Capacity evaluation of two-lane, two-way highways by simulation modelling. Univ. of Cal., Berkeley, 1975 (T.R.B. Meeting 1976).

Storost, R. Simulation des Verkehrsablaufes an Autobahnausfahrten im Hinblick auf die Bemessung des Zusatzspur. Technische Hochschule Darmstadt, 1971 (Diss.).

Todosiev, E.P. A proposed model for the driver-vehicle system (the car-following problem). Traffic Engineering 34 (1964) 6.

Todosiev, E.P. & Fenton, R.E. Velocity thresholds in car-following at night. Highway Research Record 122. Highway Research Board, Washington, 1966.

Torres, J.F. Diamond interchange traffic control. Vol. 16. Summary report on control and geometric design of diamond interchange. System Development Corporation, Santa Monica, 1973.

Treiterer, J. Some aspects of the stability of traffic flow. In: Leutzbach, W. & Baron, P. (ed.). Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 86. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969.

Wallner, F. Zum Einfluss konstruktiver Massnahmen am Fahrzeug auf das Folgeverhalten einzelner Fahrzeuge und auf das dynamische Verhalten von Fahrzeugkolonnen. Strassenverkehrstechnik 13 (1969) 6: 177-184.

Warnshuis, P. Model II; Simulation of two-lane unidirectional traffic flows. In: Munjal, P.K. (ed.). Analytical models of multilane traffic flow III. System Development Corporation. Santa Monica, Cal. (1972).

Wiedemann, R. Pulkauflösung hinter Lichtsignalen; Anwendung eines Simulationsmodells. In: Leutzbach, W. & Baron, P. (ed.). Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 86. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969.

Wiedemann, R. Simulation des Strassenverkehrsflusses. Institut für Verkehrswesen. Technische Univ. Karlsruhe, 1974.



Wiedemann, R. Simulation of traffic flow in bottlenecks. In: Papers of Symposium on geometric road design standards. OECD, Paris, 1976.

Worrall, R.D. & Bullen, A.G.R. An empirical analysis of lane-changing on multi-lane highways. Highway Research Record 303. Highway Research Board, Washington, 1970.