

INSTRUMENTATIEPROBLEMEN BIJ CAR-FOLLOWING ONDERZOEK

R-74-1

Voorburg, 1974

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Voorwoord

Samenvatting

I Inleiding

II Modellen voor car-following

III Te meten variabelen

IV Nauwkeurigheidseisen

V Meetmethoden

VI Gekozen meetmethoden

VII Specificaties voor Dopplerradar

VIII Storende factoren

IX Conclusie

Literatuur

VOORWOORD

Bij vrij druk verkeer worden de bestuurders van motorvoertuigen bij het regelen van hun snelheid in sterke mate beïnvloed door hun voorligger(s). Voor deze situatie, aangeduid met car-following of volgen, zijn een aantal theorieën en kwantitatieve modellen opgesteld. De laatste zijn beperkt tot uitwendig waarneembare bewegingskenmerken van de voertuigen.

Onderzoek van het gedrag in de volgsituatie en toetsing van de betreffende modellen kan van belang worden geacht voor meer praktisch verkeersveiligheidsonderzoek. Zo kunnen kop-staart- en kettingbotsingen worden beschouwd als het resultaat van niet goed uitgevoerd volgggedrag. Ook voor de bestudering van het effect van maatregelen als snelheidslimieten, verbeterde achterlichten, waarschuwingen voor verstoringen stroomafwaarts, is kennis van het volgggedrag van belang.

Het project car-following is gericht geweest op onderzoek van het volgggedrag in gewoon verkeer, d.w.z. met bestuurders die zich van geen experiment bewust zijn. Gebleken is dat men dan op instrumentatieproblemen stuit die met de beschikbare middelen nog niet opgelost kunnen worden, ondanks de grote vorderingen die de laatste tijd op instrumentatiegebied zijn geboekt. Reden om dit negatieve resultaat vrij uitvoerig te rapporteren is dat de bevindingen bruikbaar zijn voor gelijk gerichte onderzoeken, zowel nu als in de toekomst, wanneer mogelijk betere meetapparatuur beschikbaar komt.

Dit verslag is geschreven door ir. H. Botma, Afdeling Theorievormend Onderzoek Pre-crash projecten

Ir. E. Asmussen

Directeur

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Onderzoek van volggedrag in echt verkeer is in principe mogelijk m.b.v. een geïnstrumenteerd voertuig in de verkeersstroom dat de eigen longitudinale beweging en die van een willekeurige achterligger registreert.

Bij analyse van dit meetprobleem blijkt dat voor het meten van de relatieve beweging van de achterligger een Dopplerradar het meest in aanmerking komt maar niet aan de eisen voldoet. Bij afzien van ontwikkeling van geschikte meetapparatuur leidt dit tot de conclusie dat bij het onderzoek van verkeersstromen moet worden volstaan met registratie en analyse van minder gedetailleerde gegevens dan versnellingen en vertragingen van individuele voertuigen.

I. INLEIDING

Bij het project Verkeersstroomodellen voor aders, is na een oriëntatie besloten te beginnen met onderzoek van volggedrag in éénstrooksverkeer. Daarbij is als observatietechniek een geïnstrumenteerd voertuig gekozen, dat het volggedrag van willekeurige en zich van geen experiment bewust zijnde verkeersdeelnemers registreert. In het kort zal aangegeven worden hoe deze keuze tot stand is gekomen.

Uitgangspunt is de veronderstelling dat vele verkeerssituaties kunnen worden beschreven met behulp van drie grondpatronen:

- a. éénstrooksverkeer door aders;
- b. versmelten van twee verkeersstromen tot één;
- c. opsplitsen van één stroom in twee.

Begonnen wordt met geval a. omdat dit het eenvoudigste is.

Ter kenschetsing van éénstrooks-verkeersstromen zijn een aantal mathematische modellen opgesteld. De eenvoudigere daarvan beschrijven het gedrag van een enkele auto als gevolg van het gedrag van de directe voorligger (car-following). De meer gecompliceerde modellen trachten gehele stromen te beschrijven. Besloten is te beginnen met onderzoek van car-following modellen die van belang geacht kunnen worden voor praktisch verkeersveiligheidsonderzoek, met name als men denkt aan kop-staart- en kettingbotsingen. Bovendien is kennis van het volggedrag mogelijk bruikbaar als bouwsteen voor meer gecompliceerde modellen die een vollediger beschrijving van een verkeersstroom geven. Vervolgens is gekozen voor onderzoek van car-following in echt verkeer met onwetende bestuurders. Andere mogelijkheden zijn:

1. Verdere uitbreiding van de bestaande modellen en simulatie met deze modellen; zie bijvoorbeeld Fox & Lehman (1). Dit leek niet zinvol omdat de verificatie van allerlei submodellen ontbreekt en de bijbehorende parameters onbekend zijn.
2. Onderzoek in laboratoria m.b.v. rijssimulators, zie bijvoorbeeld Wallner (2). Hierbij is de generalisatie van resultaten

naar echt verkeer problematisch.

3. Onderzoek in echt verkeer maar met proefpersonen; zie bijvoorbeeld Rockwell e.a. (3). Dit is al op grote schaal uitgevoerd en heeft ook wel tot resultaten geleid. Toch blijft ook hier de generalisatie naar echt verkeer moeilijk omdat men nooit zeker weet of de proefpersonen zich in de experimentele situatie wel "normaal" gedragen hebben.

Het gekozen onderzoek zou als het ware het sluitstuk vormen van de boven genoemde mogelijkheden 1, 2 en 3.

Als meetmethoden voor volggedrag in verkeer komen in aanmerking luchtfotografie, detectoren op de weg en een geïnstrumenteerd voertuig.

Uit een oriëntatie omtrent de luchtfotografie en een proefmeting bleek dat de versnelling van de afzonderlijke voertuigen die nodig is voor onderzoek van car-following modellen, vermoedelijk niet met voldoende nauwkeurigheid te bepalen was.

De literatuur, Ohio State University (4) en Breiman (5), die in de loop der tijd beschikbaar kwam, bevestigde deze indruk.

Hieruit volgt overigens niet dat deze meetmethode voor onderzoek van verkeersstromen in het algemeen onbruikbaar is.

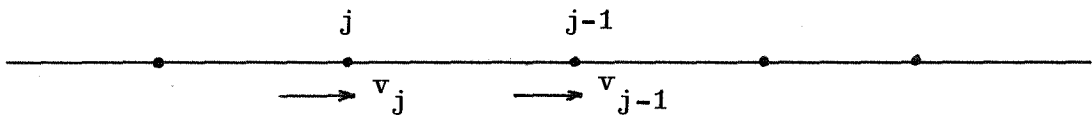
Ook voor detectoren op de weg geldt dat de baan van de afzonderlijke voertuigen voor de bepaling van de versnelling niet voldoende nauwkeurig kan worden geregistreerd. Blijft over het geïnstrumenteerde voertuig waarbij gebruik gemaakt kan worden van meettechnieken als radar en laser, die de laatste jaren sterk ontwikkeld en verbeterd zijn.

Dit verslag is beperkt tot een verkenning van de mogelijkheden om vanuit een met het verkeer meerrijdende geïnstrumenteerde auto gegevens te verkrijgen ter toetsing van car-following modellen.

II. MODELLEN VOOR CAR-FOLLOWING

1. Algemeen

Beschouw van een stroom voertuigen op een rijstrook alleen de bewegingen evenwijdig aan de richting van de weg (longitudinale beweging). Dit komt erop neer dat de voertuigen voorgesteld kunnen worden door punten of streepjes die zich langs een lijn bewegen.



Voertuig j volgt voertuig $j-1$ op een zekere afstand die in de tijd varieert. De bestuurder zal trachten niet op zijn voorligger te botsen en in veel gevallen de tussenafstand ook niet zo groot kunnen laten worden dat het gedrag van de voorligger hem niet beïnvloedt.

De car-following modellen trachten een beschrijving te geven van dit "volggedrag" en gaan er vanuit dat dit voor een groot deel verklaard kan worden uit de bewegingen van de voorligger. Men kan ook stellen dat voertuig j reageert op het gedrag van voertuig $j-1$, en komt zo tot de formulering: reactie = gevoeligheid maal stimulus.

Voor de reactie wordt het resultaat van de bediening van gas- en rempedaal genomen, de versnelling.

De belangrijkste stimulus lijkt het snelheidverschil van beide voertuigen te zijn. De gevoeligheid wordt in de eenvoudige modellen constant gesteld, in de meer gecompliceerde modellen is het een functie van de onderlinge afstand en de eigen snelheid.

Een essentieel aspect van het verschijnsel is de tijd die de bestuurder nodig heeft voor waarnemen, verwerken, beslissen en handelen. Deze tijd, plus nog de vertraging ten gevolge van het voertuig, wordt samengevat in één "reactietijd" τ . Zo komt men

tot het volgende model:

$$a_j(t + \tau) = F(v_r(t), v_j(t), x_r(t), p) \quad (3.1.)$$

$a_j(t + \tau)$ = versnelling v_j op tijdstip $t + \tau$

$$v_r(t) = \text{relatieve snelheid} = v_j(t) - v_{j-1}(t)$$

$$x_r(t) = \text{onderlinge afstand} = x_j(t) - x_{j-1}(t)$$

τ en p zijn parameters van het model; p kan uit een aantal parameters bestaan.

In deze vorm is het niet nodig verschil tussen stimulus en gevoeligheid te maken.

Illustratie:

Eén van de eenvoudigste modellen is:

$$a_j(t + \tau) = \lambda v_r(t) \quad (3.2.)$$

Wat uitvoeriger is:

$$a_j(t + \tau) = \mu v_r(t) x_r(t)^{-\alpha} v_j(t)^\beta \quad (3.3.)$$

met $p = (\mu, \alpha, \beta)$

2. Discussie van de modellen

Niemand zal verwachten dat modellen van het bovenstaande type het volgedrag perfect zullen beschrijven.

Het gaat erom in welke mate dit nog het geval is. Verwacht mag worden dat modellen van het boven besproken type voornamelijk de schommelingen om een evenwicht beschrijven. Voor beschrijving van processen als het naderen van een voorligger met groot snelheidsverschil, het optrekken van een file uit stilstand, het geforceerd tot stilstand komen van een file, zullen de modellen in meer of mindere mate gemodificeerd moeten worden.

Ook als men er vanuit gaat dat het volgedrag voornamelijk door uitwendig waarneembare kenmerken van de voorligger wordt bepaald, is de volgende kritiek mogelijk.

1. Het gedrag is gelijk voor versnellen en vertragen.

Dit verschil zou in de waarden van de parameters tot uiting kunnen komen.

2. Het effect van de remlichten ontbreekt.

Ook dit bezwaar kan ondervangen worden door parameters van de toestand van het remlicht afhankelijk te maken.

3. De bestuurder neemt continu waar.

Dit is niet juist en de tijd tussen de waarnemingen is niet constant. Dit effect lijkt moeilijk in model te brengen.

4. De bestuurder reageert op oneindig kleine veranderingen met oneindig kleine reacties.

Met dit effect kan d.m.v. drempelwaarden en discrete reacties rekening gehouden worden.

5. Met de begrenzing van de versnelling is geen rekening gehouden.

Dit kan wel, waarbij nog rekening gehouden moet worden met het feit dat de boven- en benedengrens op verschillende wijze van de snelheid en tevens van het wegdek en voertuig afhangen. Zie bijvoorbeeld Lewis (6).

6. Het model is volledig deterministisch.

Het toevalskarakter kan in de parameters ondergebracht worden en/of in een extra term van het model. Zie bijvoorbeeld Herman e.a. (7), waarin (3.2.) is uitgebreid tot:

$$a_j(t + \tau) = \lambda v_r(t) + \xi(t) \quad (3.4.)$$

Hierbij is $\xi(t)$ een stochastisch proces, de zgn. natuurlijke versnellingsruis, die optreedt als een voertuig alleen op een weg rijdt en de bestuurder een constante snelheid probeert te handhaven.

Uit metingen blijkt dat ξ ongeveer normaal verdeeld is met gemiddelde 0 en een zekere standaardafwijking σ , afhankelijk van de weg (en voertuig en bestuurder).

Gevonden waarden voor σ zijn, zie Herman (7) en Montroll (8):
op rechte weg met perfect wegdek $0,1 \text{ m/s}^2$
op bochtige weg met slecht wegdek $0,6 \text{ m/s}^2$
in tunnel met goed wegdek $0,2 \text{ m/s}^2$

In het algemeen kan aan bovengenoemde bezwaren dus wel tegemoet gekomen worden door het model uit te breiden. Als alle uitbreidingen nodig zijn, dreigt het model overigens wel onhanteerbaar te worden.

Zoals al eerder is opgemerkt is bij dit onderzoek gekozen voor verificatie van, om te beginnen, eenvoudige modellen. Blijken deze niet te passen dan leveren de resultaten wellicht aanwijzingen op in welke richting men de uitbreidingen moet zoeken.

Als laatste en belangrijkste bezwaar moet vermeld worden dat in bovenstaande modellen de reactie alleen afhangt van de directe voorligger en niet van de voor-voorliggers en achterligger(s). De remedie is in theorie heel eenvoudig, nl.

$$a_j(t + \tau) = F_{-1}(\text{gedrag } j-1) + F_{-2}(\text{gedrag } j-2) + \dots + F_1(\text{gedrag } j+1) + \dots \quad (3.5.)$$

Praktisch leidt dit soort modellen bij verificatie in echt verkeer tot grote problemen m.b.t. de instrumentatie. Alleen waarnemen vanuit de lucht lijkt een reële oplossing, maar hiermee kan, zoals eerder opgemerkt, de versnelling niet nauwkeurig worden bepaald.

III. TE METEN VARIABELEN

Met een geïstrumenteerd voertuig (meetauto) moeten de eigen longitudinale bewegingen en die van een willekeurige achterligger (volger) gemeten worden ter onderzoek van car-following modellen.

Dan moeten de volgende variabelen direct gemeten of uit andere metingen afgeleid worden:

- a. versnelling van volger
- b. relatieve snelheid van volger
- c. onderlinge afstand
- d. snelheid van volger
- e. toestand remlicht van meetauto

De laatst genoemde variabele lijkt belangrijk, is eenvoudig te meten en is daarom aan de lijst toegevoegd. Deze variabelen zullen verder de car-following variabelen genoemd worden. Daarnaast zijn er andere factoren die de longitudinale bewegingen van de volger kunnen beïnvloeden. Deze factoren kunnen ten dele tijdens de rit vastgelegd worden door de bemanning van de meetauto. Ook kan gebruik gemaakt worden van de foto's van de volger die gemaakt worden (zie hoofdstuk VI).

In hetgeen volgt wordt een opsomming gegeven van de zgn. niet-specifieke car-following factoren.

1. Type meetauto

Deze factor zal niet gevarieerd kunnen worden omdat de meetapparatuur een speciaal ingerichte auto vereist. Van belang is dat de bestuurder van de volger vermoedelijk niet door de meetauto heen kan kijken vanwege de meetapparatuur.

2. Laterale positie meetauto in rijstrook

Deze factor kan gevarieerd worden en de globale waarde is eenvoudig waar te nemen.

3. Laterale positie volger in rijstrook

Hieruit kan wellicht afgeleid worden of de bestuurder van de volgauto al of niet langs zijn voorligger probeert te kijken. Het kan zijn dat dit rechtstreeks waarneembaar is voor de waarnemer in de meetauto en/of dat het volgt uit de foto's van de achterligger.

4. Verkeersomstandigheden in omgeving van meetauto

Hieronder worden verstaan de eigenschappen (type voertuig) en het gedrag (snelheid, onderlinge afstand) van voertuigen voor, naast en achter de combinatie meetauto-volger. Dit voor zover nog van belang voor het gedrag van de bestuurder van de volger. Het is echter juist dit laatste punt dat onbekend is. Ideaal zou zijn dat men deze globale verkeersomstandigheden vanuit een met de meetauto meevliegend luchtvoertuig zou waarnemen. Verondersteld wordt dat dit vanwege de hoge kosten hoogstens een enkele maal mogelijk is, en dat voor de grote hoeveelheid met de meetauto te verrichten metingen een andere oplossing moet worden gevonden.

5. Eigenschappen bestuurder van volger

Welke de relevante eigenschappen zijn voor het gedrag in het verkeer is nog niet bekend. Bovendien zijn in deze situatie maar weinig eigenschappen waarneembaar; te denken valt aan het geslacht en een leeftijdklasse. Belangrijke eigenschappen als ervaring in het verkeer, speciaal op de weg waar gemeten wordt, en stemming zijn niet waarneembaar.

6. Aantal en eigenschappen passagiers van volger

Wat betreft het aantal lijkt in indeling in 0, 1, meer dan 1, voldoende en nog waarneembaar. Wat betreft de eigenschappen zal hoogstens geslacht en een leeftijdklasse waarneembaar zijn.

7. Eigenschappen voertuig van volger

Deze kunnen uit het merk van het voertuig en het bouwjaar (via kentekennummer) afgeleid worden. Eventuele gebreken van het

voertuig zullen in het algemeen niet waargenomen kunnen worden.

8. Eigenschappen van de weg

Te denken valt aan: aantal rijstroken, breedte rijstrook, aanwezigheid vluchtstrook, type wegdek, toestand wegdek (bijvoorbeeld nat), wegmeubilair, gebods- of adviesborden, hellingen, bochten, verlichting. Deze eigenschappen zijn op de verlichting en de toestand van het wegdek na alle permanent en kunnen voor of na de meting waargenomen worden.

9. Weersomstandigheden

Neerslag, wind en mist zijn van belang en kunnen eenvoudig waargenomen worden.

10. Politietoezicht

De zichtbare aanwezigheid van politietoezicht tijdens of enige tijd voor de meting is van meer belang dan een algemeen gemiddelde. Wat de bestuurder van de volger echter in de tijd voor dat hij geobserveerd wordt, gezien heeft, is moeilijk vast te stellen.

11. Bijzondere omstandigheden

Bijvoorbeeld sporen van een recent ongeval, een wegversmalling i.v.m. werkzaamheden.

Opmerkingen n.a.v. deze lijst factoren:

1. De lijst is vermoedelijk niet volledig.
2. Sommige factoren zijn niet waarneembaar.
3. Het aantal waarneembare factoren is aan de grote kant. Door de inrichting van de metingen kan het echter gereduceerd worden.
4. Er is geen theorie omtrent de invloed van deze factoren op de longitudinale bewegingen van een voertuig.

Stel echter dat er een car-following model is dat redelijk goed is aan te passen aan de longitudinale bewegingen. Dit betekent dat voor een aantal parameters een waarde wordt bepaald zodat de

afwijking tussen model en meting minimaal is. Men kan dan verband gaan zoeken tussen deze parameters en de "andere factoren".

Verder zou o.a. doel van een onderzoek kunnen zijn het verband tussen het individuele volggedrag en de globale kenmerken van de verkeersstroom op te sporen. Daartoe zullen op vaste plaatsen langs de weg grootheden als intensiteit, snelheidsverdeling en percentage vrachtverkeer gemeten moeten worden.

IV. NAUWKEURIGHEIDSEISEN

Voor wat betreft de car-following variabelen rijst de vraag hoe nauwkeurig men ze moet kennen teneinde een toetsing van de modellen en de bepaling van de parameters mogelijk te maken. In hetgeen volgt wordt een poging gedaan tot zinvolle eisen te komen. Hierbij moet echter nogal wat verondersteld worden. Uitgangspunt vormen de car-following modellen van het type (3.1.) en van de vorm (3.2.) en (3.3.). Het linkerlid van de vergelijkingen is de reactie van de volger. De eis dat een zekere minimale reactie en een zekere minimale reactietijd nog waargenomen moet kunnen worden, leidt tot een eis voor de nauwkeurigheid van de grootte van a_j en de tijd waarop a_j verandert. Uit de eisen voor het linkerlid van de vergelijkingen volgen eisen voor de grootheden van het rechterlid.

1. Nauwkeurigheid versnelling van volger

Een belangrijke reactie van een bestuurder is het ophouden met gas te geven zonder nog te remmen. Hierbij treedt een vertraging op van ca. 1 m/s^2 . Deze vertraging moet nog duidelijk waarneembaar zijn, wat vertaald in een vereiste nauwkeurigheid een toelaatbare fout van de orde van $0,1 \text{ m/s}^2$ oplevert.

De versnelling van de volger is een continue functie van de tijd. Door de aard van de meetmethode wordt hij een variabele die op discrete tijdstippen een waarde aanneemt. Hierbij heeft de keuze van de tijdstap Δt een grote invloed op de meetfout. Bij een gegeven meetmethode zal verkleinen van Δt in het algemeen de meetfout vergroten*. De keuze van Δt volgt hier uit de eis dat men wil kunnen constateren met welke reactietijd het systeem bestuurder plus voertuig reageert.

* Dit komt doordat de versnelling niet direct gemeten kan worden maar door differentiatie uit de snelheid wordt afgeleid.

Uit de literatuur blijkt dat de reactietijden in car-following modellen als (3.1.) variëren van 0,4 tot 2 seconden. Derhalve mag Δt niet groter gekozen worden dan 0,2 à 0,3 seconden.

Conclusie: toelaatbare fout in versnelling volger van de orde $0,1 \text{ m/s}^2$ bij tijdstap 0,2 à 0,3 s.

2. Nauwkeurigheid rechterlid van de car-following vergelijking

De fout bij de bepaling van het rechterlid van een car-following model als (3.1.) moet kleiner dan of gelijk zijn aan de fout van het linkerlid. Zolang de gedaante van het rechterlid echter niet bekend is kan men de invloed van de fouten van de diverse grootheden niet bepalen. Met behulp van de modellen (3.2.) en (3.3.) kan men echter toch de eisen wel enigszins kwantificeren.

3. Nauwkeurigheid relatieve snelheid van volger

Neem als model vergelijking (3.2.)

$$a_j(t + \tau) = \lambda v_r(t)$$

Uit de onderzoeken van Chandler e.a. (9) blijkt dat λ ongeveer $\frac{1}{2} \text{s}^{-1}$ is.

Hiermee volgt uit de eis voor a_j meteen de eis voor v_r : toelaatbare fout van de orde 0,2 m/s.

4. Nauwkeurigheid onderlinge afstand

Neem als model vergelijking (3.3.)

$$a_j(t + \tau) = \mu v_r(t) x_r(t)^{-\alpha} v_j(t)^\beta$$

De fout in a_j , δa_j , t.g.v. de fout in x_r , δx_r , is dan:

$$\delta a_j = \mu v_r (-\alpha) x_r^{-\alpha-1} v_j^\beta \delta x_r \quad (5.1.)$$

Het model beschreven door vergelijking (3.3.) is een verfijning van het model beschreven door vergelijking (3.2.), λ is vervangen door $\mu x_r^{-\alpha} v_j^\beta$.

Stel nu dat ook $\mu x_r^{-\alpha} v_j^\beta$ van de orde $\frac{1}{2} s^{-1}$ is. Dan volgt

$$\delta a_j = \frac{1}{2} v_r (-\alpha) x_r^{-1} \delta x_r \quad (5.2.)$$

Het hangt van de waarde van de parameter α en de optredende combinaties van v_r en x_r af hoe groot δx_r mag zijn.

Neem een ongunstig geval:

Stel $\alpha = 2$ en $v_r = 20$ m/s, dan wordt de eis voor δx_r , $\delta x_r/x_r \leq \delta a_j/20$

Met $\delta a_j = 0,1$ m/s² wordt de eis $\delta x_r/x_r \leq 0,005$ of toelaatbare relatieve fout in x_r is $\frac{1}{2}\%$.

5. Nauwkeurigheid snelheid van volger

Neem weer als model vergelijking (3.3.).

De fout in a_j t.g.v. de fout v_j , δv_j , is dan:

$$\delta a_j = \mu v_r x_r^{-\alpha} \beta v_j^{\beta-1} \delta v_j \quad (5.3.)$$

Stel weer $\mu x_r^{-\alpha} v_j^\beta = \frac{1}{2}$ dan volgt $\delta a_j = \frac{1}{2} v_r \beta v_j^{-1} \delta v_j$.

Stel $\beta = 1$ en $v_r = 20$ m/s, dan wordt de eis voor δv_j

$$\delta v_j/v_j \leq \delta a_j/20.$$

Met $\delta a_j = 0,1$ m/s² wordt de toelaatbare relatieve fout in v_j 1%.

Opmerking 1: Bovengenoemde kwantitatieve eisen zijn zeer voorlopig. Wat werkelijk geëist moet worden blijkt vermoedelijk pas als er experimenten gedaan worden.

Opmerking 2: De eisen gelden voor de variabelen zelf. Als de variabelen niet rechtstreeks gemeten worden maar uit andere worden afgeleid, volgen hieruit eisen voor die andere variabelen.

Opmerking 3: Een punt dat nog nadere aandacht verdient is de toelaatbare fout in de versnelling van de volger, orde $0,1 \text{ m/s}^2$, t.o.v. de in hoofdstuk II genoemde natuurlijke versnellingsruis met standaardafwijkingen van $0,1$ tot $0,6 \text{ m/s}^2$.

Hieruit zou kunnen volgen dat de eis te streng is, men dreigt de niet relevante ruiscomponent van de versnelling te willen gaan meten.

Aan de andere kant blijkt - zie o.a. Herman (7) en Torres (10) - dat versnellingen in car-following situaties in gewoon verkeer meestal niet buiten het gebied $-1,5$ tot $+ 1,5 \text{ m/s}^2$ komen. Dit wijst erop dat het meten en interpreteren van de versnelling van een voertuig een lastige zaak is, signaal en ruis zijn in grootte vergelijkbaar.

V. MEETMETHODEN

Het moeilijke punt vormen de variabelen die de beweging van de willekeurige volger beschrijven. Men kan vanuit de meetauto slechts de relatieve beweging van de volger bepalen en uit een combinatie met de gemeten eigen beweging de absolute beweging van de volger afleiden.

Er zijn verschillende oplossingen:

A. Meet x_r en v_{j-1} .

Differentieer x_r tot v_r .

v_j volgt uit v_r en v_{j-1} .

a_j volgt uit differentiatie van v_j .

B. Meet v_r en v_{j-1} .

v_j en a_j volgen dan als onder A.

x_r volgt uit integratie van v_r ; nodig is dan nog een integratieconstante, d.w.z. de bepaling van x_r op één tijdstip. Praktisch zal men x_r vaker bepalen ter calibratie van de integratie.

Het meten van v_{j-1} met voldoende nauwkeurigheid lijkt een oplosbaar probleem. Er is verder dan ook weinig aandacht aan besteed.

Voor het meten van x_r of v_r komen de volgende meetmethoden in aanmerking.

1. Fotomethode

Van de volger worden foto's gemaakt. Uit de schijnbare vergroting en verkleining van een vaste en bekende afstand op de voorkant van de volger is de afstand x_r af te leiden. Het blijkt dat deze methode wel geschikt is om x_r zelf voldoende nauwkeurig te bepalen, maar niet zo precies dat v_r en a_j er met de vereiste nauwkeurigheid uit af te leiden zijn.

2. Acoustische methoden

Met geluidsgolven, al of niet gemoduleerd, kunnen ook afstanden en snelheden gemeten worden. Deze methoden lijken niet zo ge-

schikt omdat de voortplantingssnelheid van geluidsgolven in lucht nogal afhankelijk is van de temperatuur en de vochtigheid van de lucht.

3. Optische methoden

Vooraf de recente mogelijkheden van laserstralen leken veelbelovend.

Aan de T.P.D. T.N.O./TH is in oktober 1969 opgedragen na te gaan of lasers bruikbaar zijn voor het meten van volgafstanden met als specificaties: afstanden 5 - 50 m; nauwkeurigheid: enige cm; meetfrequentie 2 à 5 sec.

In het rapport van de T.P.D. van december 1970 wordt een bepaald meetsysteem, dat aan de gestelde eisen kan voldoen, voorgesteld. Verder onderzoek van de componenten van dit systeem wordt nodig geacht.

Reden om dit onderzoek niet voort te zetten is het feit dat bij het voorgestelde meetsysteem de laserstraal op het nummerbord van de volger gericht moet blijven. Dit bijkomstige probleem lijkt alleen door gebruik van kostbare servosystemen oplosbaar.

4. Radartechnische methoden

Pulsradar voor het meten van x_r is niet geschikt omdat de korte looptijd van de puls tot grote technische problemen leidt.

Continuous-wave radar voor het meten van v_r , kortweg Dopplerradar, lijkt een geschikte methode.

Daarnaast bestaan er meer gecompliceerde radartechnieken, bijv. met frequentiemodulatie van de draaggolf. Deze komen pas in aanmerking als Dopplerradar niet geschikt blijkt te zijn.

Bij de oriëntatie over de mogelijke meetmethoden is, behalve uit literatuur, informatie verkregen uit contacten met de industrie en wetenschappelijke instellingen.

Dit alles heeft tot de overtuiging geleid dat Dopplerradar de meeste kansen op succes bood.

VI. GEKOZEN MEETMETHODE

Gemeten wordt als onder punt B in hoofdstuk V is beschreven. De relatieve snelheid, v_r , wordt met Dopplerradar bepaald. Uit de eis voor de versnelling van de volger, a_j , volgt de eis voor v_r : toelaatbare fout van de orde 0,01 m/s bij $\Delta t = 0,2$ à $0,3$ s.

De snelheid van de meetauto, v_{j-1} , wordt gemeten met een nog nader te bepalen instrument. Uit de eis voor a_j volgt: toelaatbare fout als bij v_r .

De onderlinge afstand, x_r , volgt door integratie van v_r .

De integratieconstante wordt bepaald door een x_r meting met de fotomethode, eventueel meer dan één maal per aansluitende $v_r(t)$ meting.

De fotomethode wordt ook gebruikt t.b.v. het vastleggen van een aantal niet-specifieke car-following factoren.

Bij de gekozen meetmethode is de Dopplerradar het meest kritieke element, daarom is hier verder de meeste aandacht aan besteed.

VII. SPECIFICATIES VOOR DOPPLERRADAR

Deze specificaties zijn slechts globaal; het is niet mogelijk van te voren precies te bepalen aan welke eisen nog onder welke omstandigheden voldaan moet worden.

1. Meetbereik

De relatieve snelheid zal in het algemeen klein zijn. Voorlopig wordt het bereik gesteld op -10 tot $+20$ m/s, d.w.z. de volger nadert met een maximale v_r van 20 m/s en verwijdt zich met een v_r van maximaal 10 m/s. (Voor onderzoek van uitsluitend volggedrag kan met een kleiner bereik worden volstaan).

2. Nauwkeurigheid

De toelaatbare absolute fout in v_r is van de orde $0,01$ m/s bij een meettijd Δt van $0,2$ à $0,3$ s.

Het gaat hier om de absolute fout omdat v_r nog gedifferentieerd moet worden.

3. Afstandsbereik

De relatieve snelheid moet gemeten kunnen worden bij afstanden tussen meetauto en volger van 1 m tot 50 m en bij voorkeur tot 100 m.

4. Verkeersmilieu

Er moet gemeten kunnen worden op alle rijstroken van autosnelwegen en autowegen bij verkeer van hoge intensiteit.

5. Camouflage

Bij de metingen in het verkeer zal de bestuurder van de volger niet mogen merken dat hij geobserveerd wordt. Dit heeft consequenties voor de afmetingen en de opstelling van de apparatuur, speciaal voor wat betreft de antenne.

6. Opstelling in rijdend voertuig

Dit heeft consequenties voor de robuustheid van de apparatuur en de mogelijke voeding.

7. Uitgangsgrootheden

Het lijkt het beste het laagfrequentie Dopplersignaal, waarvan de frequentie evenredig met de absolute relatieve snelheid is, en het teken van de relatieve snelheid als uitgangsgrootheid te nemen. Deze zullen geschikt moeten zijn voor analoge of digitale registratie.

VIII. STORENDE FACTOREN

Onder ideale omstandigheden kan met een Dopplerradar aan de specificaties voor wat betreft meetbereik, nauwkeurigheid en afstandsbereik wel voldaan worden. Bij de term ideale omstandigheden moet men dan denken aan een vast opgestelde antenne die reflecties ontvangt van een vlakke plaat. De werkelijke situatie wijkt hier nogal sterk van af. In het volgende worden een aantal storende factoren besproken die de ideale werking van de Dopplerradar aantasten.

1. De achterligger is een nogal grillig gevormd reflecterend object. Dit heeft tot gevolg dat het gereflecteerde signaal gecompliceerd is, fasesprongen kan vertonen en zelfs kan verdwijnen door uitdoving. Aan deze effecten is weinig te doen. Een mogelijke oplossing voor het verdwijnen van het signaal is het aanbrengen van een tweede ontvangantenne. De omschakeling van de ene naar de andere antenne moet dan automatisch gebeuren, afhankelijk van de ontvangen signaalsterkte.

Het zou wel eens kunnen dat "rondneuzige" auto's (VW kever, 2 CV) zulke slechte reflectoren zijn dat de snelheid ervan niet te meten is.

Dit betekent dan dat de meetmethode niet geschikt is.

2. Behalve de longitudinale beweging, waar het hier om gaat, voert de achterligger nog andere bewegingen uit, veroorzaakt door het niet volmaakte wegdek, optrekken, remmen, bochtenwerk en motortrillingen.

Bewegingen t.g.v. oneffenheden van de weg zijn vermoedelijk van hogere frequentie dan de frequenties in de longitudinale snelheidsveranderingen waar het om gaat: dit zal overigens wel sterk afhankelijk zijn van het type auto. Laterale snelheden worden door de Dopplerradar in principe niet gemeten, het reflectiepatroon kan er wel door veranderen.

3. Ook de auto waarin de Dopplerradar is geïnstalleerd is onder-

hevig aan storende bewegingen t.g.v. wegdek, remmen, enz. Dit betekent dat het uitgezonden signaal geen vaste richting heeft. De storing is te dimmen door de antenne op een, door een servo-systeem horizontaal te houden, platform te monteren. Deze oplossing is echter niet aantrekkelijk vanwege de grote kosten.

4. Reflecties van het wegdek. De reflecties van het wegdek die meteen weer naar de antenne gaan (retro-flecties) leveren een snelheid in de buurt van de eigen snelheid van de meetauto. Dit maakt het misschien mogelijk de storing door filtering te verwijderen. De voorkeur verdient echter eliminatie door dimensionering van de antenne.

Het wegdek kan ook als een spiegel werken wat zgn. multiple path effecten mogelijk maakt die storend kunnen zijn.

Denkbaar is ook nog dat een droog en nat wegdek verschillende storingen veroorzaken.

5. Reflecties van vaste objecten langs de weg (wegmeubilair), zoals bermbeveiligingsconstructies, brugleuningen, lichtmasten, verkeersborden, bomen.

Hiervoor geldt ongeveer hetzelfde als voor het wegdek.

6. Reflecties van het overige verkeer.

Deze zijn te onderscheiden in:

- a. achterliggers. Deze zullen ten dele in de "schaduw" van de achterligger vallen en zich bovendien op een grotere afstand bevinden, waardoor deze storing mogelijk niet zo belangrijk is;
- b. naastliggers (auto's in andere rijstroken die de meetauto en achterligger inhalen of ingehaald worden). Deze vormen vermoedelijk de grootste storingsbron omdat ze lange tijd op korte afstand aanwezig kunnen zijn en de relatieve snelheid van achterligger en naastligger ongeveer gelijk kan zijn;
- c. tegenliggers. Individuele tegenliggers zijn maar korte tijd aanwezig en hebben een grote relatieve snelheid wat mogelijkheden tot filtering geeft. Het aantal tegenliggers kan wel groot

zijn en dan is de storing vrijwel permanent aanwezig.

7. Bochten en hellingen van de weg.

Hierdoor kan de bundel te veel naast, boven of onder de achterligger terecht komen. Een remedie lijkt alleen het richten van de antenne met de hand.

8. Weersomstandigheden zoals regen en mist.

Bij radar met golflengtes van 2 à 3 cm schijnen regen en mist geen moeilijkheden te veroorzaken; bij 9 mm radar is storing te verwachten bij regen t.g.v. verstrooiing.

9. Bijzondere situaties, zoals onderdoorgangen, tunnels en hoogspanningsleidingen boven de weg. Eventueel lijkt het wel acceptabel als bij deze situatie niet gemeten kan worden.

IX. CONCLUSIE

Gezien de specificaties en de storende factoren kwamen geraadpleegde radartechnici tot de conclusie dat geavanceerde en nog niet bestaande apparatuur nodig was voor dit meetprobleem. Ontwikkeling van deze apparatuur zou een langdurige en kostbare zaak worden waarbij succes van tevoren niet geheel verzekerd was.

Overwegende dat ontwikkeling van meetapparatuur geen specifieke taak voor de SWOV is, werd besloten hier niet toe over te gaan. Dit betekent dat onderzoek van volgedrag op de manier zoals in dit verslag is geschetst niet uitvoerbaar is. Met de meetmethode luchtfotografie en detectoren op de weg is onderzoek van car-following modellen eveneens niet mogelijk.

Voor het totale onderzoek verkeersstromen betekent dit dat voorlopig moet worden volstaan met registratie en analyse van minder gedetailleerde gegevens dan versnellingen en vertragingen van individuele voertuigen.

LITERATUUR

1. Fox, P. & Lehman F.G. Safety in car-following; A computer simulation. Newark College of Engineering, 1967.
2. Wallner, F. Zum Einfluss konstruktiver Massnahmen am Fahrzeug auf das Folgeverhalten einzelner Fahrzeuge und auf das dynamische Verhalten von Fahrzeugkolonnen. Strassenverkehrstechnik 6 (1969) 177 - 184.
3. Rockwell, T.H.; Ernst, R.L. & Hanken, A. A sensitivity analysis of empirically derived car-following models. Transportation Research 2 (1968) 363-373.
4. Ohio State University. Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetry techniques. Interim-report EES 278-3. Ohio State University, 1970.
5. Breiman, L. On estimating position and velocity of cars from discrete time aerial photographic data. System Development Corp, 1969.
6. Lewis, P.A. Driver behaviour equations: Some limits on their solution due to vehicle dynamics. Traffic Engineering & Control 12 (1970) 414 - 416.
7. Herman, R. et al. Traffic dynamics: Analysis of stability in car-following. Operations Research 7 (1959) 86 - 106.
8. Montroll, E.W. Acceleration noise and clustering tendency of vehicular traffic. Proceedings Symposium theory traffic flow I/1959/147-157.
9. Chandler, R.E.; Herman, R.; Montroll, E.W. Traffic dynamics: Studies in car following. Operations Research 6 (1958) 165-184.
10. Torres, J.F. Acceleration noise, power spectra and other statistics derived from instrumented vehicle measurement under freeway driving conditions. System Development Corp, 1969.