

STATE OF THE ART RAPPORT "VERKEERSSTROOMMODELLEN"

Deel III. Het basisdiagram

R-77-41

Ir. H. Botma

Voorburg, november 1977

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Samenvatting

Symbolen

1.	<u>Inleiding</u>	1
2.	<u>Definitie van het basisdiagram</u>	2
3.	<u>Modellen voor het basisdiagram</u>	4
3.1.	Inleiding	4
3.2.	Empirische modellen	5
3.3.	Analogie verkeersstroom en stromend medium	6
3.4.	Modellen gebaseerd op mesoscopische beschrijvingen van de verkeersstroom	8
3.4.1.	Vervorming van de verdeling van de wensnelheden	8
3.4.2.	Mesoscopische verkeersstroomodellen	9
3.5.	Modellen gebaseerd op microscopische beschrijvingen van de verkeersstroom	10
3.5.1.	Statisch afstand houden	10
3.5.2.	Dynamisch afstand houden	12
3.5.3.	Microscopische simulatiemodellen van de verkeersstroom	15
3.6.	Overige modellen	15
3.6.1.	Multi-regime model van Franklin	15
3.6.2.	Model voor ader met geregelde kruisingen	16
3.7.	Vergelijking van de modellen	17
4.	<u>Geldigheid</u>	19
4.1.	Aspecten van onderzoek	19
4.2.	Meetmethoden	20
4.2.1.	Algemeen	20
4.2.2.	Waarnemen op één wegdoorsnede	20
4.2.3.	Waarnemen op twee wegdoorsneden	21
4.2.4.	Bewegende waarnemer	21
4.2.5.	Combinatie van vaste en bewegende waarnemers	22
4.2.6.	Luchtfoto's en film	23

4.3.	Analyse	23
4.3.1.	Periode	23
4.3.2.	Verdeling	24
4.3.3.	Model	24
4.4.	Resultaten	24
5.	<u>Toepassingen</u>	27
5.1.	Betekenis voor wegontwerp en verkeerskwaliteit	27
5.2.	Voorbeelden van toepassingen	29
6.	<u>Slotbeschouwing</u>	30
6.1.	Evaluatie	30
6.2.	Relatie met verkeerskwaliteiten	31
6.3.	Conclusies	31

Literatuur

Afbeeldingen

SAMENVATTING

In het derde deel van het State of the art rapport "Verkeersstroommodellen" wordt het basisdiagram behandeld. Het is een representatie van de relatie die in evenwicht bestaat tussen twee van de drie macroscopische verkeersstroomkenmerken intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid. In evenwicht wil hier zeggen dat de grootheden enige tijd constant zijn.

Een groot aantal theoretische modellen van het basisdiagram wordt behandeld. Ze berusten op diverse veronderstellingen omtrent het gedrag van voertuig-bestuurderscombinaties in de verkeersstroom of op een analogie tussen een verkeersstroom en een fysische stroming. Het blijkt dat verschillende uitgangspunten soms tot hetzelfde basisdiagram leiden.

Vervolgens worden onderzoeksaspecten behandeld. Van belang is of het wegvak al of niet homogeen is, zowel voor de representatie van de wegkenmerken als voor de keuze van de meetmethode. De in aanmerking komende meetmethoden worden kort besproken. De belangrijkste resultaten van het vele onderzoek en de nog bestaande lacunes in de kennis worden aangegeven.

Tenslotte wordt de betekenis van het basisdiagram voor wegontwerp en verkeerskwaliteit besproken, waaronder de relatie met de afwikkelingsniveau's. Een aantal voorbeelden van meer specifieke toepassingen wordt gegeven.

SYMBOLLEN

A	parameter
a	versnelling
c	constante, parameter
d	voertuiglengte
k	dichtheid
k_c	kritische dichtheid
k_x	stremmingsdichtheid
q	intensiteit
q_c	capaciteit
r	verhouding kritische- tot stremmingsdichtheid
s	parameter model Franklin (car-following)
T	duur tijdvak
u	gemiddelde snelheid
u_0	gemiddelde wenssnelheid
u_c	kritische snelheid
v	snelheid
v_r	relatieve snelheid
w	gemiddelde snelheid van voertuig met oneindig grote wens- snelheid
X	weglengte
x_r	onderlinge afstand twee voertuigen
α	parameter
β	"
γ	"
$\delta(\cdot)$	deltafunctie
τ	responsietijd

1. INLEIDING

In het vorige deel zijn de macroscopische verkeersstroomkenmerken intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid en de er sterk mee samenhangende kenmerken behandeld. Wat betreft de onderlinge relaties zijn alleen degene die min of meer per definitie gelden aan de orde gekomen.

Zo gold in het algemeen dat de intensiteit gelijk was aan het product van de dichtheid en de gemiddelde snelheid. Dit wordt nu voortgezet met een behandeling van de relaties tussen twee van de drie verkeersstroomkenmerken intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid, die bekend staan onder de naam basisdiagrammen.

Een aantal modellen voor het basisdiagram zal beschouwd worden. Ze kunnen onderscheiden worden in empirische en theoretische modellen.

De laatste berusten op een meer gedetailleerde theorie omtrent het gedrag van voertuigen in een verkeersstroom en soms tevens op een analogie met een fysisch verschijnsel.

Variatie van de parameters van de theorieën, die vrijwel nog niet getoetst zijn, levert een hele klasse van verschillende basisdiagrammen.

Vervolgens komt onderzoek naar de geldigheid van de diverse modellen aan de orde en de resultaten die hiermee bereikt zijn. Hoewel dit nog betrekkelijk weinig algemene kennis heeft opgeleverd blijkt deze wel op verschillende gebieden toegepast te worden.

2. DEFINITIE VAN HET BASISDIAGRAM

Het basisdiagram is een weergave van de relatie in een statische situatie tussen de hoeveelheid verkeer en een karakteristieke snelheid van het verkeer op een wegvak. Statisch wil hier zeggen dat het gaat om waarden die in evenwicht bereikt worden, dus gedurende enige tijd constant zijn. De hoeveelheid verkeer kan omschreven worden als het aantal voertuigen dat een bepaalde wegdoorsnede per tijdvak passeert (intensiteit) of als het aantal voertuigen dat op een bepaald moment per wegvak aanwezig is (dichtheid). Voor de snelheid komen in aanmerking de gemiddelde snelheid over het wegvak (momentaan gemiddelde snelheid) en de kruissnelheid. Onder kruissnelheid wordt verstaan de gemiddelde snelheid over het wegvak, die bij gunstige weerstandigheden onder de optredende verkeerscondities nog juist op veilige wijze kan worden onderhouden. Operationalisering van de kruissnelheid is niet eenvoudig; gesteld wordt wel dat deze overeenkomt met het 85%-punt van de snelheidsverdeling (zie bv. Rörbech, 1972). De keuze valt voor het basisdiagram op de gemiddelde snelheid, omdat die eenduidiger is gedefinieerd. Tevens wordt dan een directe samenhang tussen de diverse vormen van het basisdiagram bereikt omdat in evenwicht de intensiteit gelijk is aan de dichtheid maal de momentaan gemiddelde snelheid over het wegvak. Gemakshalve wordt in hetgeen volgt deze gemiddelde snelheid aangeduid als snelheid.

Noem de intensiteit q , de dichtheid k en de snelheid u ; de drie basisdiagrammen zijn de functies $q(k)$, $u(k)$ en $u(q)$. Ze verlopen schematisch als in Afbeelding 1 en bevatten alle drie in feite dezelfde informatie. Het diagram $u(q)$ wordt het meest gebruikt, en dan meestal alleen de bovenste tak. Theoretisch, en soms ook praktisch, is het een nadeel dat het een tweewaardige functie is. Dit betekent dat intensiteit alléén niet altijd een geschikt kenmerk is voor de representatie van de toestand van de verkeersstroom. Van de overige twee kenmerken is dichtheid te verkiezen boven gemiddelde snelheid, omdat de

curve $u(k)$, en dus ook $u(q)$, vaak horizontaal verloopt voor geringe dichtheden. In dat geval volgt de snelheid uit de dichtheid, maar niet omgekeerd.

Hoe de curven kwantitatief verlopen zal afhangen van:

- wegkenmerken, zoals de breedte van de weg;
- maatregelen, zoals snelheidslimieten;
- voertuigkenmerken, zoals het voertuigtype;
- kenmerken van het bestuurdergedrag, zoals reisdoel;
- omstandigheden, zoals regen en duisternis.

Markante punten van de diagrammen zijn:

- wenssnelheid u_0 : de snelheid waarbij $q = 0$ en $k = 0$;
- capaciteit q_c , de maximale waarde van q ;
- kritische dichtheid k_c : de dichtheid waarbij $q = q_c$;
- kritische snelheid u_c : de snelheid waarbij $q = q_c$;
- stremmingsdichtheid k_s : de dichtheid waarbij $u = 0$ en $q = 0$.

Men kan de curven ook beschouwen als bovengrenzen van gemiddelde bestuurdersprestaties, die incidenteel zowel onder- als overschreden kunnen worden. Punten binnen de curven komen overeen met lagere snelheden voor een gegeven dichtheid of grotere volgafstanden en volgtijden voor een gegeven snelheid dan meestal optreden. Anderzijds kan men ook stellen dat de afwijkende punten een gevolg zijn van een verandering in de invloedsfactoren en dus bij een ander basisdiagram horen.

Sommige onderzoeken hebben aanwijzingen opgeleverd voor het bestaan van een discontinuïteit in het basisdiagram. De discontinuïteit treedt op in de buurt van het maximum van $q(k)$ en wordt gekoppeld aan de overgang van nog enigszins vrij rijden (vrij wat betreft de keuze van de snelheid) naar rijden in files. De definitie van capaciteit is dan niet meer zo vanzelfsprekend als bij een continu basisdiagram; zie Afbeelding 2.

Het feit dat van de drie kenmerken de intensiteit betrekking heeft op een wegdoorsnede en een tijdvak en de dichtheid en de snelheid betrekking hebben op een wegvak en een moment, kan

aanleiding geven tot moeilijkheden. Dit wordt vermeden indien men de drie variabelen betrekking laat hebben op een wegvak en een tijdvak. De definities, die in Deel II van dit rapport reeds uitvoeriger behandeld zijn, luiden:

$$q = \sum x_i / XT \quad k = \sum t_i / XT \quad \text{en} \quad u = \sum x_i / \sum t_i = q/k$$

De sommatie wordt uitgevoerd over alle voertuigen in het beschouwde weg-tijdvak van afmeting X (weglengte)maal T (duur tijdvak); x_i is de afgelegde afstand en t_i de verbruikte tijd van voertuig i .

De zo gedefinieerde variabelen zijn niet eenvoudig observeerbaar. Ze vormen echter wel een theoretische referentie en men kan er ook het basisdiagram voor een netwerk van wegen mee definiëren.

Min of meer hier tegenover staat de procedure alle variabelen lokaal te definiëren en observeren. De dichtheid wordt dan vervangen door de bezettingsgraad (fractie van de tijd dat een wegdoorsnede door een voertuig bezet is), die relatief eenvoudig te observeren is. In evenwicht, en als alle voertuiglengten gelijk zijn, is de bezettingsgraad evenredig met de dichtheid.

3. MODELLEN VOOR HET BASISDIAGRAM

3.1. Inleiding

Er bestaat een vrij groot aantal mathematische modellen voor het basisdiagram, gebaseerd op algemene beschouwingen, analogieën met fysische stromingen en gedrag van individuele voertuigen.

Hierbij moet bedacht worden dat de geldigheid van het afgeleide basisdiagram a-priori niet groter is dan die van de onderliggende theorie en dat hetzelfde op gaat voor het geldigheidsgebied.

Ter begrenzing van de verzameling basisdiagrammen zullen de volgende eisen gesteld worden:

- De snelheid daalt of blijft hoogstens gelijk bij toenemende dichtheid, m.a.w. $u(k)$ is monotoon niet-stijgend.
- De capaciteit bestaat, m.a.w. $q(k)$ heeft een eindig maximum.
- Als de onderliggende theorie zich uitspreekt over verkeer met:
 - a) grote dichtheid moet de stremmingsdichtheid eindig zijn;
 - b) kleine dichtheid moet de wenssnelheid eindig zijn.

Hoewel deze eisen niet erg streng zijn en ten dele vanzelfsprekend lijken worden ze hier toch vermeld. Het blijkt namelijk dat er soms basisdiagrammen gepresenteerd worden die niet aan deze eisen voldoen.

Soms wordt ook geëist dat het basisdiagram de eigenschap heeft dat de snelheid voor kleine dichtheden niet meteen afneemt, d.w.z. de afgeleide $du/dk = 0$ voor $k = 0$. Hoewel deze eigenschap niet onaannemelijk is zal hij hier niet als eis gelden omdat daarmee een groot aantal geschikte modellen buiten beschouwing zou moeten blijven.

Van de formules voor het basisdiagram worden vermeld de functie $u(k)$ en de inverse $k(u)$, $q(k) = k u(k)$ en $q(u) = u k(u)$ volgen hier dan rechtstreeks uit. Ter vergelijking van de modellen is het gewenst dat ze zoveel mogelijk dezelfde parameters

bevatten. Bij de behandelde modellen komt men dan meestal uit op de stremmingsdichtheid k_s en de kritische snelheid u_c .

Behandeld zullen worden empirische modellen (zie par. 3.2) en theoretische modellen. De laatste groep kan op dezelfde wijze ingedeeld worden als het totale rapport, nl. naar de mate van detaillering in macro, meso en micro.

a) Macroscopisch (zie par. 3.3),

Uitgaande van een veronderstelling betreffende het dynamisch gedrag van een verkeersstroom, die geïnspireerd is door een analogie met een stromend samendrukbaar medium, kan een basisdiagram worden afgeleid.

b) Mesoscopisch (zie par. 3.4).

- Een algemene beschouwing omtrent de verandering van de snelheidsverdeling als functie van de dichtheid leidt tot een basisdiagram.

- Uit de diverse modellen voor een verkeersstroom op mesoscopisch niveau kan ondermeer het basisdiagram worden afgeleid.

c) Microscopisch (zie par. 3.5).

- Specifieke veronderstellingen over het volggedrag van bestuurders, nog te onderscheiden in statisch en dynamische afstand houden, leiden tot basisdiagrammen.

- Met de diverse simulatiemodellen op microscopisch niveau kan ook het basisdiagram bepaald worden.

Tenslotte zullen nog een multi-regime model en enige bijzondere gevallen behandeld worden.

3.2. Empirische modellen

Uit gemeten waarden van q , k en u (twee van de drie is voldoende) kan men relaties tussen deze grootheden proberen af te leiden. Deze relaties hebben dan geen theoretische achtergrond en berusten op aanpassen van op het oog geschikte functies aan de gemeten waarden. Het geldigheidsgebied is beperkt tot het gebied waarin waarnemingen zijn gedaan. Aan het klassieke voorbeeld van deze aanpak is de naam Greenshields verbonden, zie Wohl & Martin (1967), waarbij de snelheid lineair afneemt bij toenemen-

de dichtheid. De formules voor dit geval zijn:

$$\begin{aligned} u(k) &= 2u_c(1-k/k_s) & k(u) &= k_s(1-u/(2u_c)) \\ k_c &= k_s/2 & u_0 &= 2u_c \end{aligned} \quad (3.1)$$

Vooraf voor de bovenste tak van $u(q)$ wordt het volgende model veel gebruikt:

$$u(q) = u_0 - c q \quad \text{met oonstante } c$$

3.3. Analogie verkeersstroom en stromend medium

Aangenomen wordt dat de verkeersstroom in een richting beschouwd kan worden als een stromend samendrukbaar medium waarbij de grootheden intensiteit, dichtheid en snelheid betekenis hebben en continu en differentieerbaar zijn naar plaats en tijd. De analogie gaat pas op vanaf een zekere dichtheid. Veronderstellingen:

$$\partial k / \partial t + \partial q / \partial x = 0$$

dit is een behoudswet voor de voertuigen;

$$u = u(k)$$

de snelheid wordt volkomen bepaald door de dichtheid, m.a.w. het basisdiagram bestaat;

$$\partial u / \partial t = -c^2 k^\alpha \partial k / \partial x$$

d.w.z. als de voertuigen een gebied binnen rijden met grotere dichtheid ($\partial k / \partial x$ positief) neemt de snelheid af en omgekeerd; hoe dit gebeurt hangt af van de dichtheid en de parameters c en α .

De laatste veronderstelling omtrent het dynamisch gedrag van

de verkeersstroom is de meest bijzondere.

Afhankelijk van de parameter α kunnen uit de veronderstellingen twee vormen van het basisdiagram afgeleid worden, zie Drew (1965). Gezien het geldigheidsgebied van de veronderstellingen kan de randvoorwaarde $u(k_s) = 0$ gebruikt worden. Hiermee wordt de integratieconstante geëlimineerd. De parameter c kan geëlimineerd worden ten bate van de kritische snelheid.

1. $\alpha = -1$

$$u(k) = u_c \ln(k_s/k) \quad k(u) = k_s / \exp(u/u_c)$$

$$k_c = k_s/e \quad u_c = c \quad u_0 = \infty \quad (3.2)$$

Dit model is geïntroduceerd door Greenberg (1959).

2. $-3 < \alpha$ en $\alpha \neq -1$

$$u(k) = (\alpha+3)(\alpha+1)^{-1} u_c \left[1 - (k/k_s)^{(\alpha+1)/2} \right]$$

$$k(u) = k_s \left[1 - (\alpha+1)(\alpha+3)^{-1} (u/u_c) \right]^{2/(\alpha+1)}$$

$$k_c = \left[2/(\alpha+3) \right]^{2/(\alpha+1)} k_s \quad u_c = 2c(\alpha+3)^{-1} k_s^{(\alpha+1)/2}$$

$$u_0 = \begin{cases} \infty & \text{voor } -3 < \alpha < -1 \\ (\alpha+3)(\alpha+1)^{-1} u_c & \text{voor } -1 < \alpha \end{cases} \quad (3.3)$$

Voor $\alpha \leq -3$ bestaat de capaciteit niet.

Zie Afbeelding 3 voor $u(k)$ en $q(k)$ met $\alpha = -2, -1, 1$ corresponderend met $k_c/k_s = 1/4, 1/3, 1/2$.

3.4. Modellen gebaseerd op mesoscopische beschrijvingen van de verkeersstroom

3.4.1. Vervorming van de verdeling van de wensnelheden

Deze beschouwing is afkomstig van Haight (1963) en wordt geïllustreerd in Afbeelding 4. Stel dat de snelheden van de voertuigen bij zeer geringe dichtheden, formeel als de dichtheid naar nul nadert, een kansdichtheid $f_1(v)$ hebben. Indien de dichtheid groter wordt kunnen de voertuigen hun wensnelheid niet meer handhaven, de kansdichtheid van de snelheden wordt afhankelijk van de dichtheid; noteer dit als $f_2(v;k)$. Dan geldt: $f_2(v;0) = f_1(v)$ en $f(v;k_s) = \delta(v)$. De deltafunctie $\delta(v)$ betekent dat voor $k = k_s$ alle voertuigen snelheid nul hebben. Het bereik van v in $f_1(v)$ is in principe onbeperkt: $0 \leq v < \infty$. In $f_2(v;k)$ is v wel begrensd, $0 \leq v \leq w(k)$; de bovengrens $w(k)$ is een functie van de dichtheid en is de gemiddelde snelheid van voertuigen waarvan de wensnelheid tot oneindig nadert. Alle kansdichtheden f_2 die bovengenoemde eigenschappen hebben zijn in principe geschikt. Het basisdiagram $u(k)$ volgt uit het bepalen van de gemiddelde snelheid over $f_2(v;k)$.

$$u(k) = \int_0^{w(k)} v f_2(v;k) dv \quad (3.4)$$

Haight noemt als voorbeeld voor f_2 de Beta-kansdichtheid die voor dichtheid nul in de Gamma-kansdichtheid overgaat.

$$\begin{aligned} f_2(v;k) &= c_1 v^{\alpha-1} (w-v)^{\beta-1} & 0 < v < w(k) \\ f_1(v) &= c_2 v^{\alpha_0} \exp \left[-\beta_0 v \right] & 0 < v < \infty \end{aligned} \quad (3.5)$$

c_1 en c_2 zijn constanten die zo gekozen worden dat de integraal van de kansdichtheid = 1. Voor $w(k)$ komt elke functie

in aanmerking die van $w(0) = \infty$ monotoon daalt naar nul voor $k = k_s$, bv.

$$w(k) = k_s/k-1 \quad (3.6)$$

Hieruit kan afgeleid worden:

$$u(k) = u_c(1-k/k_s) / (k_c/k_s - 2 k/k_s + k/k_c)$$

$$k(u) = k_s(u_c/u - k_c/k_s) / (k_s/k_c - 2 + u_c/u)$$

$$u_0 = u_c k_s/k_c \quad (3.7)$$

Voor $k_c/k_s = \frac{1}{2}$ is het bovenstaande model gelijk aan dat van Greenshields (zie par. 3.3.2). Zie Afbeelding 5 voor $u(k)$ en $q(k)$ bij $k_c/k_s = 1/4, 1/3$ en $1/2$.

Opm.: De eisen die aan de functie $w(k)$ worden gesteld zijn erg ruim. Zolang er geen redenen zijn aan een bepaald $w(k)$ de voorkeur te geven kunnen dus vele basisdiagrammen afgeleid worden, waarvan het bovenstaande slechts een voorbeeld is.

Een bezwaar tegen dit model is dat de verdeling van de wenssnelheden ook een eindige kans aan zeer lage snelheden toekent, wat niet realistisch lijkt.

3.4.2. Mesoscopische verkeersstroommodellen

De mesoscopische modellen zullen worden besproken in Deel VI van dit rapport en behandelen de relaties tussen mesoscopische kenmer-

ken van een verkeersstroom. In het algemeen kan uit deze modellen het minder gedetailleerde basisdiagram worden afgeleid, waarvoor dan echter meestal geen formules meer kunnen worden gegeven.

Genoemd kunnen worden:

A) Analogie verkeersstroom en stroom van deeltjes

Uitgaande van deze analogie, waarbij met name aan een gas is gedacht, is een Boltzmann-achtige vergelijking opgesteld voor de kansdichtheid van de snelheden. De vergelijking is een integraaldifferentiaalvergelijking waarvan de homogene en stationaire oplossing het basisdiagram oplevert; zie Prigogine (1971). Voor het verkrijgen van de oplossing is de wenssnelheidsverdeling nodig.

B) Clustermodellen

Hierbij staat de vorming, de groei en de afbraak van clusters centraal. Clusters zijn, globaal gesteld, voertuigen die in nader te definiëren groepen rijden ten gevolge van beperkte inhaalmogelijkheden. Een dergelijk clustermodel is o.a. opgesteld door Brilon (1974) voor een tweestrooks enkelbaansweg en door Gebhardt (1972) voor een tweestrooks rijbaan van een autosnelweg. Het basisdiagram dat uit deze modellen wordt afgeleid geldt hoogstens voor dichtheden kleiner dan de kritische.

3.5. Modellen gebaseerd op microscopische beschrijvingen van de verkeersstroom

3.5.1. Statisch afstand houden

Verondersteld wordt dat de bestuurders afhankelijk van de snelheid een zodanige afstand tot hun voorligger kiezen, dat ze bij plotseling afremmen van de voorligger tot stilstand, een botsing kunnen vermijden. Dit is dus een veronderstelling omtrent het microscopische gedrag van voertuig-bestuurdercom-

binaties. Stelt men verder dat alle bestuurders zich identiek gedragen, dan kan hier uit een basisdiagram afgeleid worden. Het geldigheidsgebied is dan beperkt tot de dichtheden waarbij het afstand houden tot de voorligger een belangrijke rol speelt.

Stel voertuig $j-1$ vertraagt met een vertraging a_{j-1} ; zie Afbeelding 6. Voertuig j reageert na een responsietijd τ met remvertraging a_j . Afgeleid kan worden dat een botsing vermeden wordt als:

$$x_r \gg d + v_j \tau + v_j^2 / (2a_j) - v_{j-1}^2 / (2a_{j-1}) \quad (3.8)$$

In de beschouwde situatie zullen de snelheden van beide voertuigen niet veel verschillen; stel $v_j = v_{j-1} = u$. Vervang de onderlinge afstand x_r door $1/k$. Stel $1/a_j - 1/a_{j-1} = 1/a$; verondersteld wordt dat $a > 0$, d.w.z. bestuurder j doet als of zijn remvertraging kleiner is dan die van zijn voorligger. ($a < 0$ levert geen zinnige resultaten). Neem verder aan dat de bestuurders niet meer dan de minimaal benodigde afstand aanhouden, dan wordt vergelijking (3.8) een gelijkheid. Zodoende volgt:

$$k = 1 / (d + u \tau + u^2 / (2a)) \quad (3.9)$$

Toepassing van de randvoorwaarde $u(k_s) = 0$ levert $d = 1/k_s$; de betekenis van d is nu veranderd van voertuiglengte in fictieve voertuiglengte bij stremming. Bij de formules voor $u(k)$ en $k(u)$ zijn de parameters a en τ geëlimineerd ten bate van u_c en k_c .

$$\begin{aligned} u(k) &= (u_c/2) \left[2 - (k_s/k_c) + \left\{ (k_s/k_c)^2 - 4k_s/k_c + 4k_s/k \right\}^{1/2} \right] \\ k(u) &= k_s / \left[1 + u(k_s - 2k_c) / (u_c k_c) + u^2 / u_c^2 \right] \\ k_c &= k_s / \left[2 + \tau (2a k_s)^{1/2} \right] \\ u_c &= (2a/k_s)^{1/2} \quad u_0 = \infty \end{aligned} \quad (3.10)$$

Een uitvoerige beschouwing over de capaciteit bij dit model wordt gegeven door Flury (1972).

Zie Afbeelding 7 voor $u(k)$ en $q(k)$ met $k_c/k_s = 1/4, 1/3$ en $1/2$.

3.5.2. Dynamisch afstand houden

Dit wordt beschreven door de zogenaamde car-following modellen die uitvoeriger behandeld worden in Deel VIII van het rapport. Hier is het voldoende te vermelden dat car-following modellen beschrijven hoe een bestuurder de versnelling van zijn voertuig regelt afhankelijk van eigen bewegingskenmerken en die van de voorligger. De modellen gelden in principe slechts voor verkeer met grote dichtheid en zonder mogelijkheid tot inhalen. Uit de modellen kan men basisdiagrammen afleiden door integratie, veronderstellend dat alle voertuigen zich identiek gedragen en de responsietijd verwaarloosd kan worden.

Een bepaalde klasse van modellen, voor het eerst in zijn geheel beschouwd door Gazis et al (1961), heeft de vorm:

$$a_j(t+\tau) = c \left[v_j(t) \right]^\beta \left[v_{j-1}(t) - v_j(t) \right] / \left[x_r(t) \right]^\delta \quad (3.11)$$

met a_j = versnelling, τ = responsietijd en parameters c , β en δ . Zie Afbeelding 6 voor de notatie. Met responsietijd nul en invoering van de relatieve snelheid $v_r = v_{j-1} - v_j$ ontstaat:

$$a_j / (v_j)^\beta = c v_r / (x_r)^\delta \quad (3.12)$$

Integratie van deze vergelijking en overgang van individuele op collectieve grootheden, x_r wordt $1/k$ en v_j wordt u , levert een hele klasse basisdiagrammen. Vermeld zullen slechts worden de gevallen met een eindige stremmingsdichtheid en een capaciteit. Doet men dit niet dan ontstaan nog meer typen basisdiagrammen, zie May & Keller (1967). Er kunnen drie gevallen onderscheiden worden. Bij de formules voor $u(k)$ en $k(u)$ is de para-

meter c van het car-following model geëlimineerd ten bate van de kritische snelheid u_c .

1. $\beta < \gamma < 1$

$$\begin{aligned}
 u(k) &= u_c \left[(\gamma - \beta)(1 - \gamma)^{-1} \left\{ (k_s/k)^{1-\gamma} - 1 \right\} \right]^{1/(1-\beta)} \\
 k(u) &= k_s / \left[1 + (1 - \gamma)(\gamma - \beta)^{-1} (u/u_c)^{1-\beta} \right]^{1/(1-\gamma)} \\
 k_c &= \left[(\gamma - \beta)(1 - \beta)^{-1} \right]^{1/(1-\gamma)} k_s \\
 u_c &= \left[c(1 - \beta)(\gamma - \beta)^{-1} k_s \gamma^{-1} \right]^{1/(1-\beta)} \quad u_0 = \infty \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

2. $\beta < \gamma = 1$

$$\begin{aligned}
 u(k) &= u_c \left[(1 - \beta) \ln(k_s/k) \right]^{1/(1-\beta)} \\
 k(u) &= k_s \exp \left[-(1 - \beta)^{-1} (u/u_c)^{1-\beta} \right] \\
 k_c &= k_s \exp \left[-(1 - \beta)^{-1} \right] \\
 u_c &= c^{1/(1-\beta)} \quad u_0 = \infty \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

3. $\beta < 1 < \gamma$

Als geval $\beta < \gamma < 1$ behalve dat:

$$u_0 = (\gamma - \beta)(\gamma - 1)^{-1} u_c^{1/(1-\beta)} \quad (3.15)$$

Vaak wordt dit geval vermeld met u_0 als parameter i.p.v. u_c .

$$u(k) = u_0 \left[1 - (k/k_s) \gamma^{-1} \right]^{1/(1-\beta)} \quad (3.16)$$

Het blijkt dat de basisdiagrammen die afgeleid zijn uit de analogie met een stromend medium (in par. 3.3) bijzondere gevallen zijn van de bovenstaande, nl. met $\beta=0$ en $\gamma=(\alpha+3)/2$. Het empirische

model van Greenshields correspondeert met $\beta=0$ en $\gamma=2$. Zie Afbeelding 8 voor $u(k)$ en $q(k)$ met $\beta=\frac{1}{2}$ en $\gamma=1; 1,5; 2; 3,5$ corresponderend met $k_c/k_s = 0,14; 0,25; 1/3; 1/2$.

Een ander car-following model is opgesteld door Franklin (1962).

$$a_j(t+\tau) = c(1-v_j(t)/u_0) (v_{j-1}(t) - v_j(t)) \quad (3.17)$$

Dit model kan op dezelfde manier als de voorgaande geïntegreerd worden tot een basisdiagram. Het resultaat is:

$$\begin{aligned} u(k) &= u_0 \left[1 - \exp \left[c(1/k_s - 1/k)/u_0 \right] \right] \\ k(u) &= c k_s / \left[c - u_0 k_s \ln(1-u/u_0) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

De kritische dichtheid en snelheid zijn in dit geval geen expliciete functie van c , u_0 en k_s . Met de introductie van een nieuwe parameter r is echter een vorm voor $u(k)$ af te leiden die beter vergeleken kan worden met de andere modellen.

$$\begin{aligned} u(k) &= u_c \left[1 - \exp \left[r s(1-k_s/k) \right] \right] / \left[1 - \exp \left[s(r-1) \right] \right] \\ k_c &= r k_s \quad u_c = u_0 \left[1 - \exp \left[s(r-1) \right] \right] \quad u_0 = c/(s r k_s) \quad (3.19) \\ s &\text{ is de positieve oplossing van } s+1 = \exp \left[(1-r)s \right] \end{aligned}$$

Zie Afbeelding 9 voor $u(k)$ en $q(k)$ met $r = 1/4, 1/3$ en $1/2$.

Van recenter datum is een car-following model van Ceder (1976).

$$a_j(t+\tau) = c \exp \left[- \ln A / (k_s x_r(t)) \right] v_r(t) / x_r^2(t) \quad (3.20)$$

Integratie voor $A \neq 1$ levert:

$$\begin{aligned} u(k) &= u_0 (A^{1-k/k_s} - 1) / (A-1) \\ k(u) &= k_s \left[1 - \left[\ln(1+(A-1)u/u_0) \right] / \ln A \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

en voor $A=1$ het in par. 3.2 behandelde model van Greenshields. De kritische dichtheid en snelheid zijn voor $A \neq 1$ geen expliciete functie van A , u_0 en k_s ; $r = k_c/k_s$ is de oplossing van

$$A^{r-1} + r \ln A = 1 \quad (3.22)$$

Ceder stelt dat het model voor lage en hoge dichtheden verschillende parameterwaarden nodig heeft, m.n. $A < 1$ en $A > 1$ voor resp. kleine en grote dichtheid. In feite heeft het model dan dus 6 parameters en als men de grensdichtheid of een grensgebied tussen kleine en grote dichtheid meetelt 7 of 8.

3.5.3. Microscopische simulatiemodellen van de verkeersstroom

Beschouwt men behalve het volgen ook andere manoeuvres als naderen voorligger en inhalen, op microscopisch niveau, dan is de combinatie tot een analytisch model niet meer mogelijk. Een oplossing bieden dan de zogenaamde simulatiemodellen, waarbij de individuele voertuigbewegingen worden nagebootst met behulp van een digitale rekenmachine. Deze modellen worden besproken in Deel VIII van het rapport. Met behulp er van kan o.a. het basisdiagram worden bepaald. Recente voorbeelden hiervan zijn het model van Warnshuis (1972) voor een rijbaan van een auto-snelweg en dat van Brilon (1977) voor een tweestrooks enkelbaansweg.

3.6. Overige modellen

3.6.1. Multi-regime model van Franklin

Voornamelijk gebaseerd op experimenten op laboratoriumwegen heeft Franklin (1965) een model voor het basisdiagram opgesteld. Vanaf een dichtheid nul treden achtereenvolgens op (zie Afbeelding 10):

- Verkeersstroom met clusters (platooned flow).

De snelheid is constant, dus geldt $q = k u_0$.

- Verkeersstroom in overgangsgebied (transition range).

Nu geldt dat de intensiteit constant is; kritische dichtheid en snelheid zijn in dit geval een interval in plaats van een punt.

- Quasi gelijkmatige verkeersstroom (quasi-steady flow).

Nu geldt $q = (1 - k/k_s) / \tau$, gebaseerd op een benodigde volgafstand die gelijk is aan een constante $(1/k_s)$ plus de snelheid maal de responsietijd τ .

- Ongelijkmatige verkeersstroom (unsteady flow).

Bij zeer lage snelheden kunnen de bestuurders hun snelheid niet goed meer afstemmen op de beschikbare afstand.

3.6.2. Model voor ader met geregelde kruisingen

De voorgaande modellen waren alle op een of andere manier gebaseerd op interacties van voertuigen. Er is natuurlijk ook interactie met wegkenmerken en in sterke mate is dit het geval op een ader met door verkeerslichten geregelde kruisingen. Fowkes (1972) heeft hiervoor een zeer schematisch model opgesteld. Verondersteld wordt dat de kruisingen zich op vaste afstanden (de bloklengte) bevinden en dat de groentijd van alle gelijktijdig begint en even lang duurt. Er is geen afslaand verkeer. De dichtheid is het aantal voertuigen per bloklengte en de intensiteit en gemiddelde snelheid hebben betrekking op de cyclustijd. Er kunnen maximaal n voertuigen een kruising per groenfase passeren, waarvan er maximaal m (met m hoogstens gelijk aan $n/2$) in dezelfde groenfase een tweede kruising kunnen passeren. De stremmingsdichtheid is p voertuigen per bloklengte. Afgeleid kan worden dat dan geldt (zie Afbeelding 11):

k in vtg./bloklengte	q in vtg./cyclustijd
0 tot m	2k
m tot n	$\left[\frac{(n-2m)k+nm}{(n-m)} \right]$
n tot p-n	n
p-n tot p	p-k

3.7. Vergelijking van de modellen

In de volgende tabel zijn een aantal kenmerken van de behandelde modellen opgenomen, en wel de dichtheden waarvoor ze in principe geldig zijn; of ze voor één- of tweerichtingsverkeer bestemd zijn (1 ri resp. 2 ri) en het aantal parameters.

Het laatste is van belang bij het beoordelen van onderzoek naar welk model het beste bij zekere experimentele gegevens past, omdat een model met meer parameters alleen al om die reden beter kan passen.

Model	Par.	Geldigheidsgebied		Aantal parameters
Greenshields	3.2.	alle k	2 ri	2
Stromend medium	3.3.	vanaf zekere k	1 ri	3
Haight	3.4.1	alle k	1 ri	3
Meso-model	3.4.2	tot zekere k	2 ri	-
Statisch afstand houden	3.5.1	vanaf zekere k	1 ri	3
Car-following (Gazis)	3.5.2	vanaf zekere k	1 ri	4
Car-following (Franklin)		vanaf zekere k	1 ri	3
Car-following (Ceder)		vanaf zekere k	1 ri	7 à 8
Micro simulatiemodel	3.5.3	alle k	2 ri	-
Multi-regime	3.6.1	alle k	1 ri	6 à 7

Voor een aantal verschillende modellen, waarvan de formules bekend zijn, zijn bij dezelfde waarde van k_c/k_s , nl. $1/4$, $1/3$, $1/2$, de functies $q(k)$ in één grafiek verzameld; zie Afbeelding 12.

Het blijkt dat de verschillen soms zeer gering zijn, m.a.w. uitgaande van verschillende theorieën kan men vrijwel dezelfde modellen voor het basisdiagram afleiden. Soms exact dezelfde, bv. "stromend medium" is bijzonder geval van "Gazis" en voor $k_c/k_s = 1/4$ is "stromend medium" identiek met "statisch afstand houden". Het zal moeilijk - zo niet onmogelijk - zijn met behulp van experimenteel bepaalde basisdiagrammen een uitspraak te doen over de geldigheid van het ene en de ongeldigheid van het andere model, als ze zo weinig verschillen.

4. GELDIGHEID

4.1. Aspecten van onderzoek

Het onderzoek zal bestaan uit het verzamelen van gegevens (weg- en verkeerskenmerken en omstandigheden) en een analyse. Bij de keuze van het wegvak is van belang of men het totale basisdiagram wil bepalen of een deel ervan; in het eerste geval is het noodzakelijk dat er regelmatig of in voorspelbare perioden congestie optreedt.

Van belang is ook of het te onderzoeken wegvak homogeen is, d.w.z. of de wegkenmerken constant zijn over het hele wegvak. Is dat het geval, dan kan men volstaan met de weg- en verkeerskenmerken van één doorsnede. Bij een niet homogeen wegvak is het onderzoek lastiger. De variabele wegkenmerken moeten bij voorkeur samengevat worden in niet te veel parameters. Enige voorbeelden:

• de Highway Capacity Manual (HRB, 1965) en Rørbech (1972) gebruiken het percentage weglengte met een zichtafstand groter dan 450 m, waarin horizontaal en verticaal profiel en bermvrijheid tot uiting komen;

- Duncan (1974) onderscheidt heuvelachtigheid (= gemiddelde van de absolute waarde van de afgeleide van het verticaal profiel) en bochtigheid (= gemiddelde van de absolute waarde van de afgeleide van het horizontaal profiel);

- Rankine & Hill (1974) construeren parameters die het effect van geparkeerde voertuigen, kruisingen en omgeving (in termen van landgebruik) op stedelijke wegen representeren.

In feite zijn dit kwantificeringen van het wrijvingsconcept; meer wrijving leidt tot grotere manoeuvreerinspanning en lagere snelheden.

Ook het verzamelen van verkeerskenmerken is op niet homogene wegen lastiger. Voor de intensiteit en de verkeerssamenstelling is observatie op één doorsnede nog wel toelaatbaar maar voor de snelheden niet.

Tenslotte dienen omstandigheden verzameld te worden. Daarbij valt praktisch te denken aan dag van de week en tijd van de dag (bepaalt globaal het reisdoel) en aan licht- en weersomstandigheden (zie ook blz. 2a).

4.2. Meetmethoden

4.2.1. Algemeen

De keuze van een meetmethode zal afhangen van doel en omvang van het onderzoek en van de beschikbare middelen in termen van geld, mankracht, meet- en verwerkingsapparatuur. Bij de beoordeling van een meetmethode, of beter van een waarnemingsstelsel dat meet, registreert en verwerkt, zijn de volgende punten van belang:

- opvallendheid (waardoor het te meten gedrag kan worden beïnvloed);
- aanpassing van meting, registratie en verwerking aan elkaar;
- beperkingen in het gebruik;
- betrouwbaarheid en nauwkeurigheid;
- omvang van de installatie;
- kosten.

Meer informatie hierover wordt gegeven in Deel IX van het rapport.

Het valt buiten het kader van dit deel van het rapport de meetmethoden op al deze punten te beoordelen en vergelijken. Volstaan zal worden met een korte omschrijving en de meest kenmerkende eigenschap van een aantal meetmethoden, waarbij de meetapparatuur buiten beschouwing blijft.

4.2.2. Waarnemen op één wegdoorsnede

De intensiteit en de individuele snelheden worden gemeten. Voor de gemiddelde snelheid verdient het aanbeveling niet het rekenkundige maar het harmonische gemiddelde te nemen, omdat dan de momentaan gemiddelde snelheid beter benaderd wordt. De dichtheid kan met het quotiënt van intensiteit en gemiddelde snelheid geschat worden. Men kan ook in plaats van de dichtheid de bezettingsgraad nemen.

Het voertuigtype kan door een menselijke waarnemer of met behulp van foto-, film- of videoapparatuur bepaald worden. Het kan ook afgeleid worden uit een gemeten voertuigkenmerk (lengte, hoogte, gewicht). De methode is uitsluitend geschikt voor homogene wegvakken; de eigenschappen zijn verder afhankelijk van de gebruikte apparatuur.

4.2.3. Waarnemen op twee wegdoorsneden

I) Bepalen van de reistijd door middel van voertuigidentificatie

De intensiteiten, de passagemomenten en de identiteit van de voertuigen worden geregistreerd aan de uiteinden van het wegvak. Uit de verschillen tussen de passagemomenten aan de beide uiteinden volgen de werkelijke reistijden van de voertuigen. Bij deze methode is de verwerkingsfase arbeidsintensief, omdat de gegevens van beide wegdoorsneden aan elkaar gekoppeld moeten worden. Evenals de methode voor het waarnemen op één wegdoorsnede levert deze methode in feite meer informatie dan nodig is voor het basisdiagram, nl. behalve gemiddelde snelheid of reistijd ook de individuele waarden.

De methode is o.a. gebruikt bij een omvangrijk onderzoek in Frankrijk; zie Deterne & Le Breton (1975).

II) Bepalen van de reistijd met behulp van correlatie van het intensiteitspatroon (Wright, 1974). Deze methode berust op de veronderstelling dat fluctuaties in de intensiteit zich met dezelfde snelheid voortplanten als de voertuigen. Volgens de verkeersstroomtheorie van Lighthill & Whitham (1964), die in Deel IV behandeld zal worden, geldt dit slechts zolang de snelheid gelijk is aan de vrije snelheid. Wright noemt ruimere grenzen, nl.: geen congestie en geen geregelde kruisingen op het wegvak. Hij acht de methode geïndiceerd bij automatische registratie van de intensiteit. De praktische waarde van de methode moet nog blijken.

4.2.4. Bewegende waarnemer ('moving observer')

Vanuit een met de verkeersstroom meerijgend voertuig worden de aantallen ingehaalden, inhalers en tegenliggers geregistreerd, alsook de reistijd van het voertuig zelf. Op een ader voor tweerichtingsver-

keer moet dit in beide richtingen gebeuren, op een ader voor eenrichtingsverkeer met twee ritten met verschillende reistijd. Uit de geregistreeerde aantallen voertuigen en reistijden van de waarnemers volgen schattingen voor de intensiteit en de snelheid van de verkeersstroom. De methode is naar verhouding eenvoudig en goedkoop en levert niet meer gegevens dan nodig. Voor meer details wordt verwezen naar Heere & Akkerman (1973) en Bennett (1975).

4.2.5. Combinatie van vaste en bewegende waarnemers

I) 'Floating car'

De intensiteit wordt bepaald op één of een aantal wegdoorsneden van het beschouwde wegvak. De snelheid van de verkeersstroom wordt bepaald uit de reistijd van bewegende waarnemers die trachten met de gemiddelde snelheid te rijden. Dit laatste brengt een subjectief element in de methode.

De eigenschappen van de methode zijn afhankelijk van de gebruikte apparatuur voor de intensiteitsmeting en komen ten dele overeen met die van de methode van de bewegende waarnemer.

II) Gesloten trajectorie (Wright et al, 1973; zie Afbeelding 13)

Het verkeer wordt in één richting beschouwd. Twee bewegende waarnemers rijden vanaf een punt binnen het wegvak naar de uiteinden. De ene registreert het aantal tegenliggers, de andere de aantallen inhalers en ingehaalden. Hieruit volgt de beginwaarde van het aantal voertuigen op het wegvak. Vervolgens worden aan de uiteinden de intensiteiten in vrij kleine tijdseenheden geregistreerd. Met de beginwaarde kunnen daaruit de intensiteit en dichtheid, betrekking hebbend op een weg- en tijdvak, geschat worden. Tenslotte wordt de trajectorie gesloten door de beginprocedure in omgekeerde zin uit te voeren, wat mogelijkheden biedt het effect van telfouten ten dele te corrigeren. De praktische waarde van deze methode moet nog blijken. Een beperking wordt gevormd door de conditie dat er onderweg geen voertuigen mogen verdwijnen of bijkomen, een nadeel is het mogelijk grote effect van telfouten, ondanks de correctie.

4.2.6. Luchtfoto's en -film

Het totale wegvak wordt van boven frequent gefotografeerd of gefilmd. Zodoende ontstaat een registratie die, vergeleken met de andere methoden, als continu naar tijd en plaats kan worden opgevat. Na verwerking tot voertuigtrajectoriën kunnen intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid op allerlei manieren bepaald worden, zodat de eerder genoemde meetmethoden geëvalueerd kunnen worden. Voor het bepalen van deze gegevens kan echter ook met een veel beperktere verwerking volstaan worden; vergelijk de methode van de gesloten trajectorie.

De methode van de luchtfoto's en -film is kostbaar, vooral door het arbeidsintensieve uitlezen van de films, en kan alleen gebruikt worden bij goede zichtomstandigheden. Hij is o.a. gebruikt bij een onderzoek in Amsterdam, zie Stadsontwikkeling en Verkeersonderzoek (1975).

4.3. Analyse

4.3.1. Periode

De verkeersgegevens worden meestal per periode bepaald, waarbij de vraag rijst hoe lang die moet worden gekozen. Het basisdiagram is een relatie bij evenwicht. Strikt genomen is de beste periode er dus een die even lang is als het evenwicht duurt. Praktisch wordt meestal een zekere vaste periode gekozen die enerzijds zo kort is dat een evenwicht in het algemeen nog niet veel veranderd zal zijn en anderzijds zo lang dat de steekproeffluctuaties niet te groot worden. Een kwantitatieve afweging is uitgevoerd door Zackor (1972) met als resultaat een geschikte waarde van 5 min. op autosnelwegen. Bij een te lange periode kunnen convexe functies als $q(k)$ en $q(u)$ ten onrechte afgevlakt worden. Om deze reden verdient bij de analyse het gebruik van de monotone basisdiagram $u(k)$ de voorkeur, ook als de dichtheden dan berekend moeten worden. Na afloop kan men dan eenvoudig de andere relaties hieruit afleiden.

Deze methode dient echter zeker niet blindelings toegepast te worden, zoals door Duncan (1976) is geïllustreerd.

4.3.2. Verdeling

Doel van het onderzoek is meestal een afhankelijke variabele als de gemiddelde snelheid te voorspellen uit onafhankelijke variabelen als intensiteit of dichtheid en wegkenmerken. De onafhankelijke variabelen zullen in het algemeen niet gelijkmatig over het te onderzoeken gebied verspreid liggen, waardoor veelvuldig voorkomende waarden een onevenredig grote invloed op de resultaten kunnen krijgen. Men kan dit voorkomen door een wél gelijkmatig verdeelde groep uit de totale verzameling te selecteren.

4.3.3. Model

Het is in het algemeen gewenst de verzamelde gegevens te representeren door een mathematisch model. Dit kan ontleend worden aan de reeds genoemde grote verzameling theoretische modellen; het kan ook een meer empirische achtergrond hebben.

Gewenste eigenschappen van een model zijn: dat het goed past bij de data; dat het flexibel is (niet te weinig parameters); dat het eenvoudig is (bij voorkeur eenvoudige functies en gemakkelijk te schatten parameters); dat de parameters interpreteerbaar zijn in verkeerstermen.

Technieken die in aanmerking komen voor aanpassen van een model aan de data zijn lineaire regressie, soms na transformatie tot een lineair model, en niet-lineaire regressie. Tevens kan dan een indicatie van de mogelijke spreiding in de afhankelijke variabele gegeven worden, bv. in de vorm van een betrouwbaarheidsinterval. Dit is voor de interpretatie van een resultaat een uitermate nuttig gegeven, dat helaas nog maar zelden verstrekt wordt.

4.4. Resultaten

Er is vrij veel onderzoek van het basisdiagram uitgevoerd. De kennis die verzameld is kan globaal als volgt samengevat worden.

De belangrijkste parameter capaciteit is veelvuldig onderzocht. De Highway Capacity Manual (HRB, 1965) geeft voor verschillen-

de wegtypen ideale waarden en informatie over de afwijkingen die ontstaan ten gevolge van niet-ideale weg- en verkeerskenmerken.

Op autosnelwegen is vrij veel bekend over de diagrammen voor dichtheden die kleiner zijn dan de kritische (HRB, 1965 en Beckmann et al, 1973). Op niet-autosnelwegen is veel minder bekend. Hier is het ook moeilijker algemene kennis te verkrijgen door de grotere variatie in wegkenmerken, die op een of andere manier tot zo weinig mogelijk parameters gereduceerd moeten worden, zoals reeds besproken in par. 4.1.

In Engeland (Duncan, 1974) en Frankrijk (Breton, 1976) is op relatief grote schaal het basisdiagram van een aantal typen van het landelijke wegennet onderzocht. Doel is het leveren van gegevens die nodig zijn voor economische beschouwingen samenhangend met het ontwerp van wegennetten. Bepaald is de bovenste tak van de functie $u(q)$, in afhankelijkheid van wegkenmerken en de fractie vrachtauto's.

Het effect van factoren als regen en duisternis is vrijwel niet onderzocht. Een uitzondering is het onderzoek van Jones et al (1969) naar het effect van regen op de capaciteit van een autosnelweg. Het resultaat lijkt van belang bij het wegontwerp omdat daarbij ook in andere gevallen, zoals bij het ontwerp van bogen, van de minder gunstige conditie nat wegdek wordt uitgegaan.

Speciale vermelding verdient de situatie bij een flessehals, waarbij soms in de omgeving van de kritische dichtheid een discontinuïteit in intensiteit en snelheid wordt geconstateerd; voldoende inzicht hierin bestaat echter nog niet (Edie, 1961; Beckmann et al, 1973 en Wiedemann, 1976). Ook op aders wordt in het gebied rond de kritische dichtheid wel een discontinuïteit gevonden (Ceder & May, 1976).

Algemeen geschikte mathematische modellen zijn nog niet gevonden. Voor het gebied tot aan de kritische dichtheid zijn lineaire en kwadratische functies vaak voldoende passend.

Uit het voorgaande blijkt dat er nog diverse lacunes in de kennis van het basisdiagram bestaan. Bovendien kunnen resultaten verouderen ten gevolge van veranderingen in voertuigen bestuurderskenmerken en maatregelen als snelheidslimieten. De uitvoerige gegevens in de Highway Capacity Manual zijn niet altijd van toepassing in andere landen dan de VS. Die landen hebben vaak een verschillend voertuigpark of bevinden zich in een vroegere fase van de massamotorisering.

5. TOEPASSINGEN

5.1. Betekenis voor wegontwerp en verkeerskwaliteit

Bij het ontwerp van een weg zijn de uitgangspunten: de functie van de weg in het beschouwde netwerk, de te verwachten hoeveelheid verkeer en de eisen voor de kwaliteit van de verkeersafwikkeling. Deze uitgangspunten hangen tendele samen. Veel details van de ontwerpnormen worden afgeleid uit beschouwingen over de interactie tussen een voertuig-bestuurdercombinatie en de wegkenmerken. Dit leidt bv. tot normen voor boogstraal en verkanting in afhankelijkheid van de ontwerpsnelheid.

Uit de eisen voor de diverse wegelementen volgt niet zonder meer hoe de totale weg moet worden samengesteld om tot een optimaal ontwerp te komen. Zo blijken bestuurders bij hun snelheidskeuze in het algemeen meer op de totale indruk van de weg en de omgeving te reageren dan op de afzonderlijke elementen (zie bv. Janssen, 1974).

Ook is nog onbekend hoe het verkeersgedrag wordt, als naast de interactie tussen afzonderlijke voertuigen en de weg ook die tussen de voertuigen onderling een rol gaat spelen. Bepaalde aspecten van dit gedrag worden beschreven door verkeersstroommodellen. Het basisdiagram, dat relaties beschrijft tussen gemiddelde verkeersstroomkenmerken, is hierbij de eerste stap. Deze macroscopische relaties zijn afhankelijk van de volgende geometrische wegkenmerken: het dwarsprofiel, het horizontaal en verticaal verloop en de zichtlengte. Die afhankelijkheid kan bij het ontwerp van de weg gebruikt worden om een bepaald gedrag van de verkeersstroom te bewerkstelligen. Dit is van groot belang, omdat men er meer dan vroeger naar streeft het gedrag van de verkeersstroom binnen nauwe marges te brengen, die passen bij de betreffende wegcategorie.

Intensiteit in verhouding tot de capaciteit en snelheid (kruissnelheid of gemiddelde snelheid) heeft een grote invloed op de kwaliteit van de verkeersstroom. In de Highway Capacity Manual (HRB, 1965) is deze invloed operationeel gemaakt

in de vorm van een aantal afwikkelingsniveaus, die in volgorde van afnemende kwaliteit aangeduid worden met A, B, C, D, E en F (zie Afbeelding 14).

Bij toepassing van dit concept wordt de relatie tussen kruissnelheid en intensiteit/capaciteit gebruikt in afhankelijkheid van wegkenmerken. Verondersteld wordt dat in het afwikkelingsniveau de volgende kwaliteitsaspecten, gezien vanuit het oogpunt van de bestuurder, zijn opgenomen: reistijd, onderbrekingen en beperkingen, manoeuvreervrijheid, veiligheid, rijcomfort en variabele voertuigkosten. Het is niet bekend hoe deze verschillende aspecten worden gecombineerd tot één kwaliteit. In het algemeen lijkt het wel aannemelijk dat de kwaliteit van de verschillende aspecten afneemt naarmate het afwikkelingsniveau daalt.

Zoals echter reeds in Deel II behandeld is, geldt dit niet voor de veiligheid. Een verhoging van de intensiteit, dus een daling van het afwikkelingsniveau, gaat niet steeds samen met een verhoogd ongevallequotiënt, maar dit hangt af van het type weg en de intensiteit zelf.

Onder andere op grond van beperkte financiële middelen bestaat bij het ontwerpen van wegen de neiging de toelaatbare intensiteiten te verhogen (zie TEC, 1974). Doordat op de lange termijn de snelheden een stijgende trend vertonen en het verloop van de bovenste tak van de snelheid-intensiteitscurve vermoedelijk vlakker wordt, zullen de reistijden daarvoor echter niet veel toenemen. Op basis van de bestaande kennis over de relatie tussen afwikkelingsniveau en onveiligheid mag verwacht worden dat het effect van hogere intensiteiten op de veiligheid bij sommige wegtypen negatief zal zijn. Mocht dit zo zijn, dan zijn o.a. verkeersbeheersingsystemen geïndiceerd, waarmee het samengaan van een laag afwikkelingsniveau met een hoge onveiligheid mogelijk in gunstige zin kan worden gewijzigd. Bij het afwegen van de diverse kwaliteitsaspecten, waarbij ook nog komt het effect van de verkeersstroom op de omgeving, is een gegeneraliseerde kosten-batenmethode geïndiceerd (zie bv. Flury, 1974).

5.2. Voorbeelden van toepassingen

Ontwerp wegennet. Bij het bepalen van een toekomstig optimaal landelijk autowegennet is door het NEI (1972) rekening gehouden met: reistijdskosten, exploitatiekosten van het autorijden, ongevallenkosten, investeringen en onderhoudskosten van de weg. Hierbij is o.a. gebruik gemaakt van het basisdiagram en van de relatie tussen ongevallenquotiënt en afwikkelingsniveau. Minimale maatschappelijke kosten traden op bij een belasting in het avondspitsuur die wat hoger was dan de in Nederland gehanteerde norm. Gezien de onzekerheden in de gebruikte veronderstellingen, is besloten de bestaande norm, afwikkelingsniveau C, te handhaven.

Ontwerp maatregelen. Beïnvloeding van de routekeuze (verdeling) en beperkte doorlating van het verkeer op bepaalde plaatsen (dosering) zijn maatregelen die tot doel hebben de verkeersafwikkeling te verbeteren. Bij het ontwerp hiervan heeft men o.a. de basisdiagrammen van de betreffende aders nodig (zie Stock et al, 1973).

Evaluatie maatregelen. Bij het evalueren van verkeersafhankelijke maximumsnelheden op een autosnelweg heeft Zackor (1972) o.a. het basisdiagram beschouwd. Het bleek dat met snelheidsregeling een grotere capaciteit bij een grotere dichtheid en gemiddelde snelheid optrad.

Gebruik bij meer gedetailleerde modellen. Het basisdiagram is een relatie die in evenwicht bestaat tussen macroscopische verkeersstroomkenmerken. Beschouwt men dynamische situaties, zoals de in Deel IV te behandelen kinematische golven en schokgolven van Lighthill & Whitham (1964) en het recentere dynamische model van Payne (1971), dan is het basisdiagram bruikbaar als onderdeel van het totale model.

6. SLOTBESCHOUWING

6.1. Evaluatie

De diverse modellen voor de basisdiagrammen hebben een empirische of een meer gedetailleerde theorie betreffende verschijnselen in een verkeersstroom als achtergrond. Daar de onderliggende theorie niet of nauwelijks is getoetst, is ook de geldigheid van het afgeleide basisdiagram onbekend. Opmerkelijk is dat uitgaande van verschillende theorieën vrijwel of zelfs exact dezelfde basisdiagrammen kunnen worden afgeleid.

Van basisdiagrammen die gebaseerd zijn op beperkte uitgangspunten, zoals bijvoorbeeld een veronderstelling omtrent het volgedrag, kan men geen geldigheid voor een groot dichtheidsgebied verwachten. Meer geschikt in het dit opzicht zijn de microscopische simulatiemodellen die in principe wel geldig kunnen zijn bij grote dichtheidsvariatiës.

Naar de geldigheid van de diverse modellen van het basisdiagram is betrekkelijk weinig onderzoek verricht, terwijl de gepubliceerde onderzoeken zich veelal concentreren op een aspect van het geheel. Zwakke punten bij veel onderzoek zijn de generaliseerbaarheid (relatief weinig data worden zeer gedetailleerd verwerkt en een meting wordt zelden herhaald) en de interpretatie (bij het onderscheiden van modellen is er weinig aandacht voor het relevant zijn van significante verschillen).

Meer onderzoek lijkt gewenst, m.n. meer data in dezelfde situatie, meer wegtypen en meer variatie van omstandigheden. Speciaal van belang is de situatie bij en in de omgeving van een "flessehals", waarbij nog onbekend is of en waar een duidelijke discontinuïteit optreedt. Interessant is tevens of de bezettingsgraad in tijd de dichtheid, resp. eenvoudig en lastig te observeren, kan vervangen.

De bestaande kennis betreffende het basisdiagram is bruikbaar en wordt ook toegepast bij ontwerp van wegen en maatregelen, bv.

verkeersbeheersing. Ook bij de evaluatie van maatregelen die de globale kenmerken van de verkeersstroom kunnen of bedoelen te beïnvloeden is het basisdiagram als karakterisering bruikbaar. Tevens is het bruikbaar bij meer gedetailleerde modellen van verschijnselen in een verkeersstroom.

Bedacht moet worden dat de diverse verkeersstroommodellen, waaronder het basisdiagram, niet noodzakelijk invariant zijn maar gewijzigd kunnen worden door maatregelen die gericht zijn op de mens (opleiding), het voertuig, de kenmerken van de weg en de omgeving en op regelingen als verkeersbeheersing.

6.2. Relatie met verkeerskwaliteiten

Zoals in Deel I gesteld zullen van de diverse verkeerskwaliteiten slechts onveiligheid, afwikkeling en comfort beschouwd worden. Een directe relatie tussen het basisdiagram, en in feite geldt dit min of meer voor elk te behandelen verkeersstroommodel, en de verkeerskwaliteit is er niet, d.w.z. uit een bepaalde vorm van het basisdiagram kan zonder nadere gegevens geen goede of slechte kwaliteit van de verkeersstroom voorspeld worden. Wel kan gesteld worden dat kennis van het basisdiagram, bij voorkeur in de vorm van een wiskundige relatie, bruikbaar en soms noodzakelijk is bij indicatie, ontwerp en evaluatie van maatregelen die de kwaliteit van het verkeer beogen te verbeteren of een bepaalde minimale waarde te geven. Met het onder "toepassingen" gestelde werd dit reeds geïllustreerd.

6.3. Conclusies

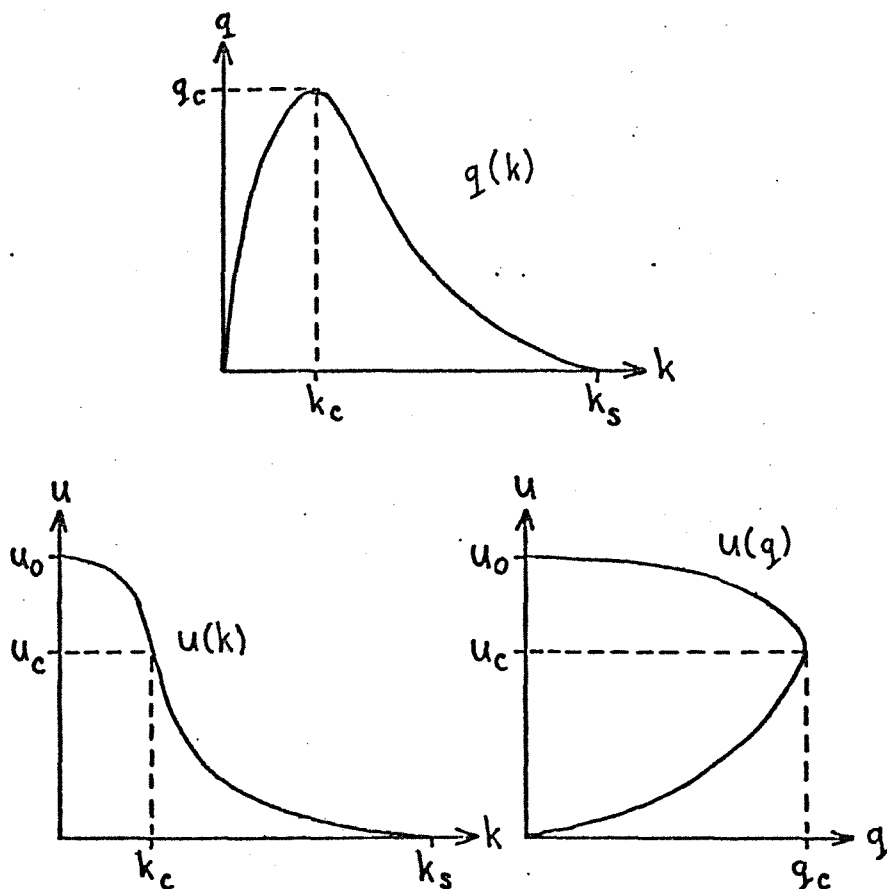
- Gezien de stijgende behoefte aan kwantitatieve beschrijvingen van een verkeersstroom, ten behoeve van het ontwerp van verkeersvoorzieningen en het beïnvloeden van het verkeer op bestaande voorzieningen, is het basisdiagram een nuttige eerste stap.
- Voor het basisdiagram bestaan een groot aantal varianten, echter de toetsing hiervan is tot nu toe te summier geweest.

- Voor het gebied waar de dichtheid kleiner is dan de kritische is op wegen van hoge categorie (autosnelwegen e.d.) vrij veel bekend van het basisdiagram.
 - Voor dichtheden groter dan de kritische is op alle categorieën minder bekend. Dit gedeelte is moeilijk te onderzoeken omdat de verkeersstroomtoestand meestal noch stationair noch homogeen is.
 - Met betrekking tot het al of niet optreden van een discontinuïteit is nog te weinig kennis verzameld voor een definitief oordeel.
 - Verder onderzoek van het basisdiagram is gewenst; te denken valt aan:
 - . wegen van hoge categorie: gebied van grote dichtheden; effect discontinuïteit van de weg; optreden van discontinuïteit in het basisdiagram;
 - . wegen van lage categorie: algemeen onderzoek; effect van wegkenmerken;
 - . op alle wegen het effect van omstandigheden als regen, schemer en duisternis;
 - . het effect van maatregelen als verlichting, al dan niet verkeersafhankelijke snelheidslimieten en inhaalverboden;
- Het onderzoek is vooral van belang voor wegtypen die regelmatig flink belast worden.

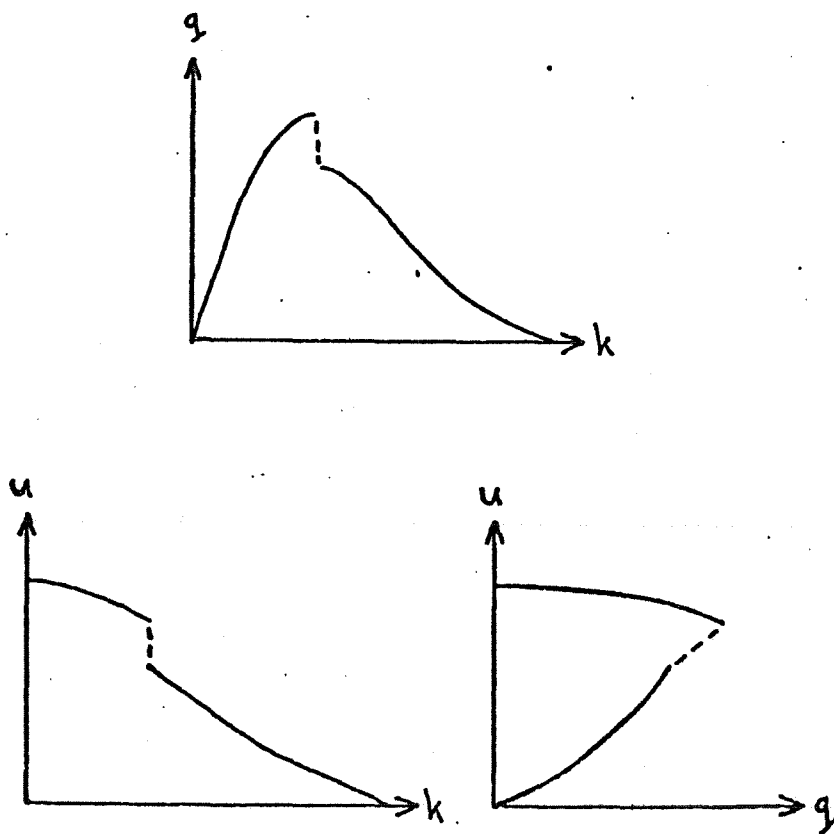
AFBEELDINGEN

Nr. Bijschrift

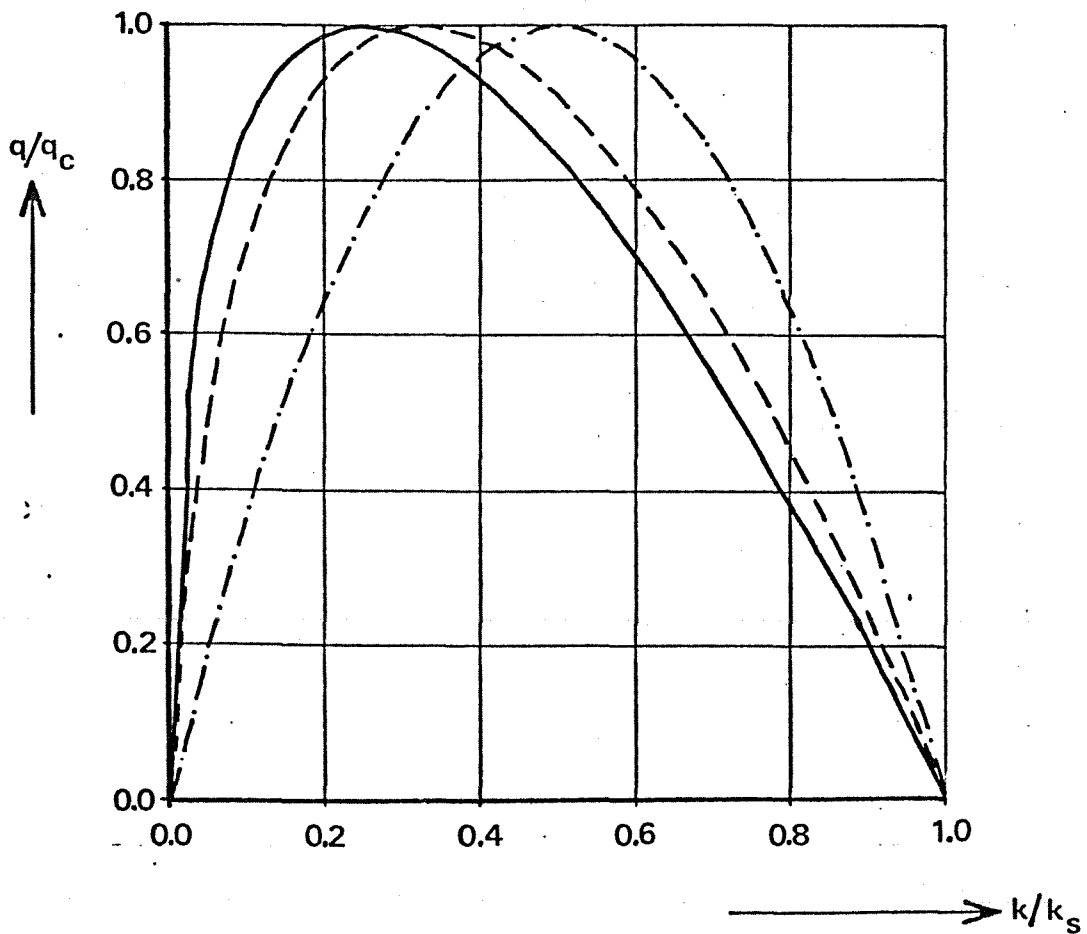
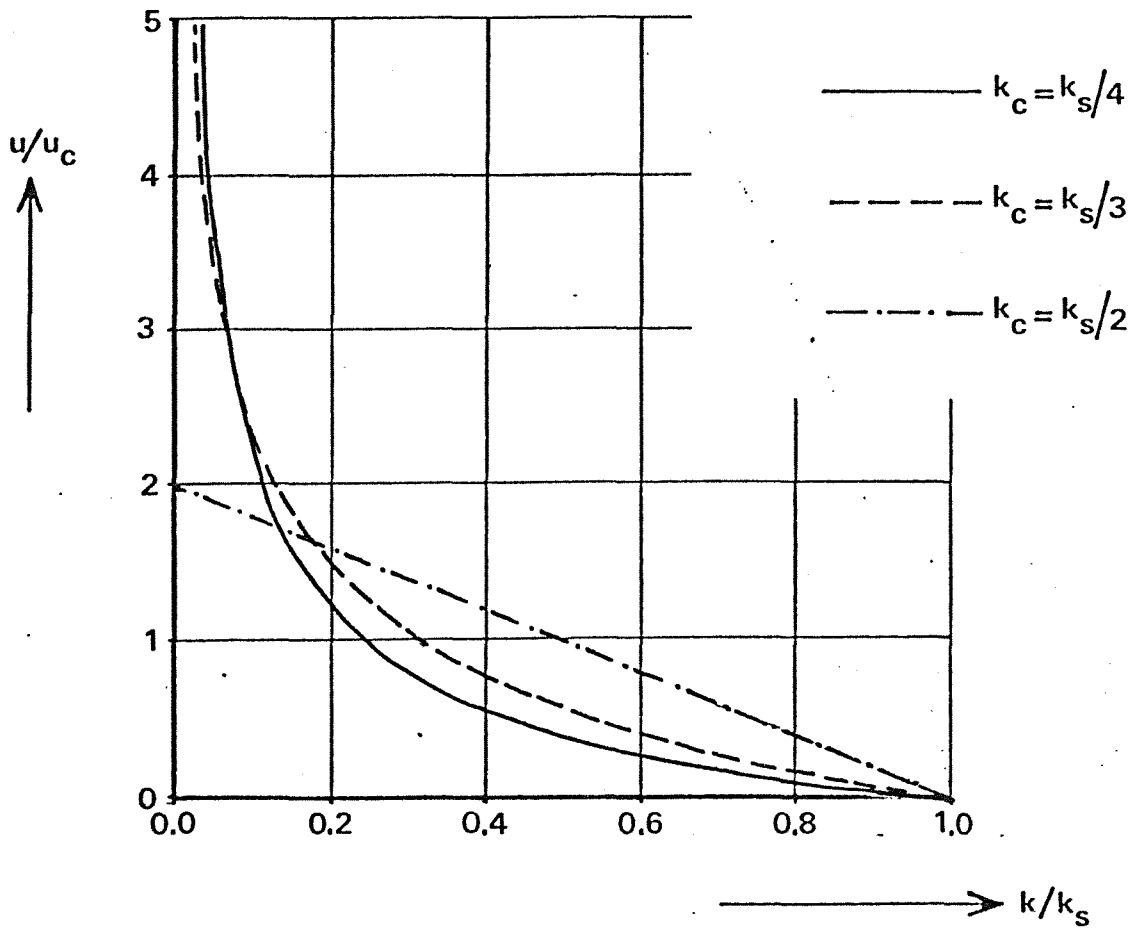
- 1 De drie vormen van het basisdiagram.
- 2 Basisdiagram met discontinuïteit.
- 3 Model stromend medium.
- 4 Kansdichtheid van snelheden als functie van de dichtheid.
- 5 Model van Haight.
- 6 Notatie bij het afstand houden.
- 7 Model afgeleid uit benodigde remweg.
- 8 Model afgeleid uit car-following model van Gazis.
- 9 Model afgeleid uit car-following model van Franklin.
- 10 Model van Franklin. Bron: Franklin (1965).
- 11 Model van Fowkes. Bron: Fowkes (1972).
- 12 Vergelijking modellen voor $k_c/k_s = 1/4, 1/3, 1/2$.
- 13 Meetmethode "gesloten trajectorie".
- 14 Afwikkelingsniveau's. Bron: HRB (1965).



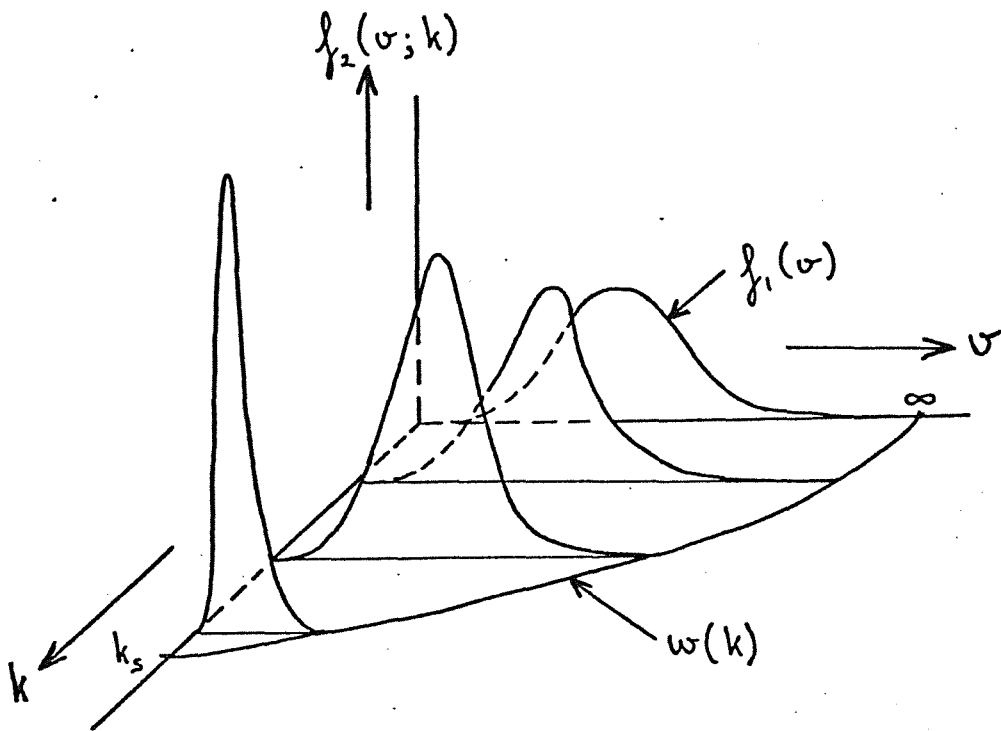
Afbeelding 1. De drie vormen van het basisdiagram.



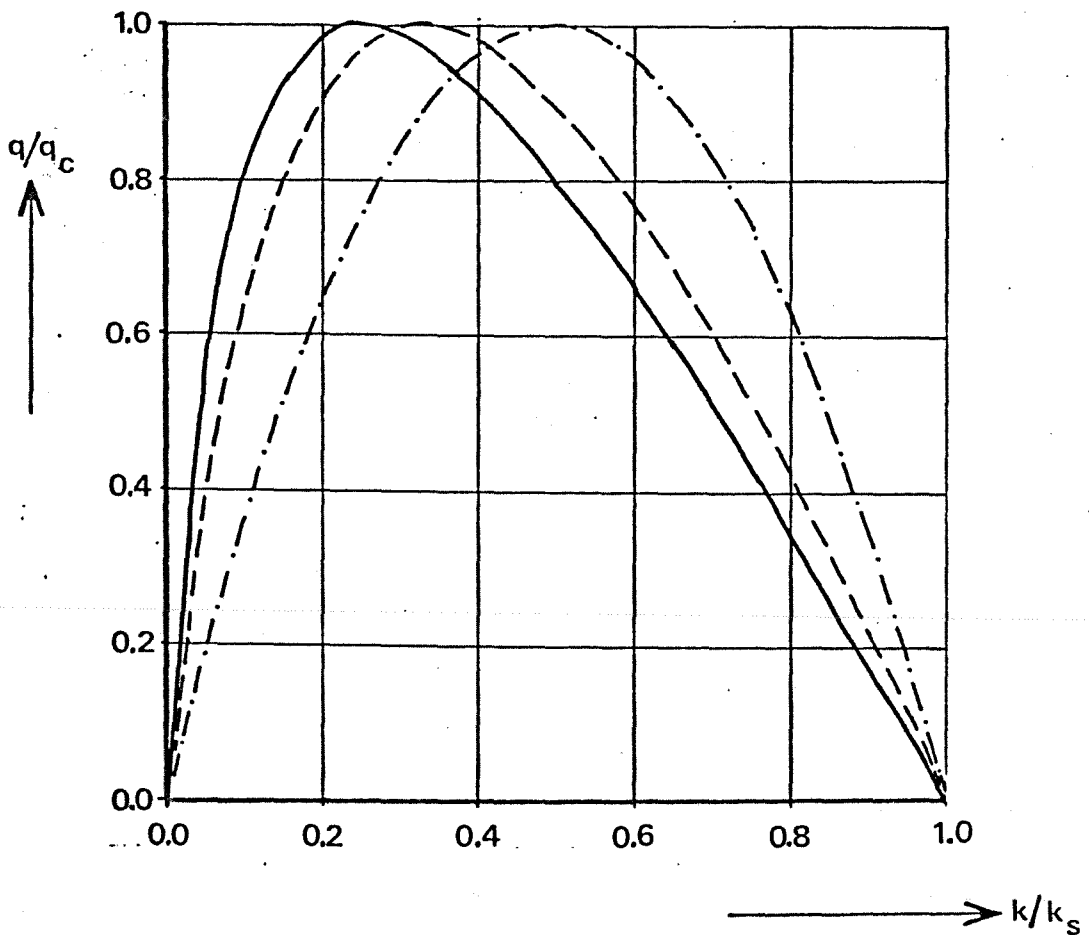
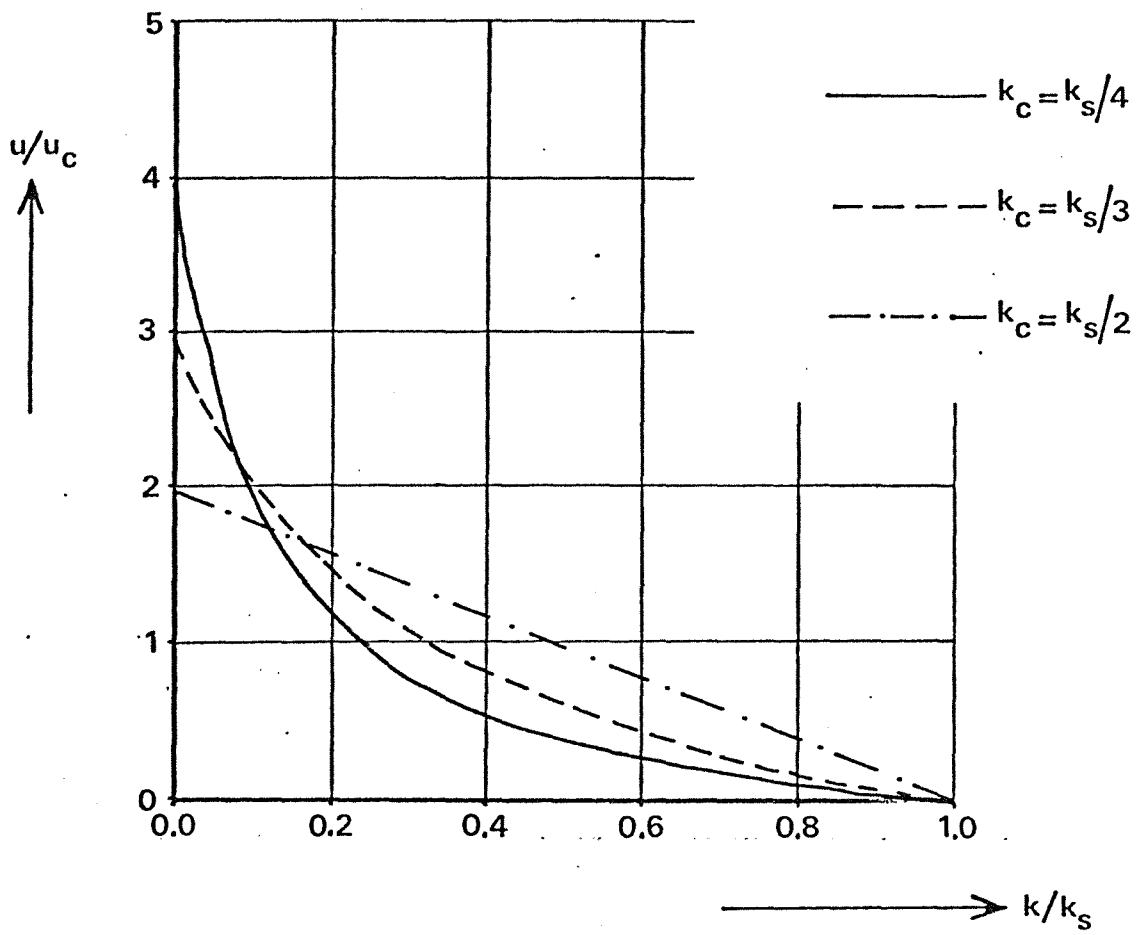
Afbeelding 2. Basisdiagram met discontinuïteit.



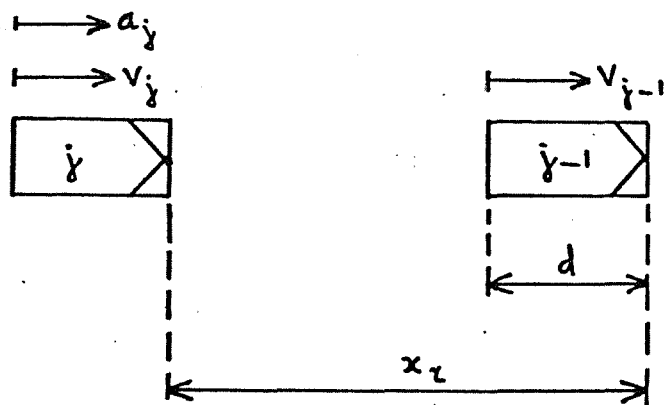
Afbeelding 3. Model stromend medium.



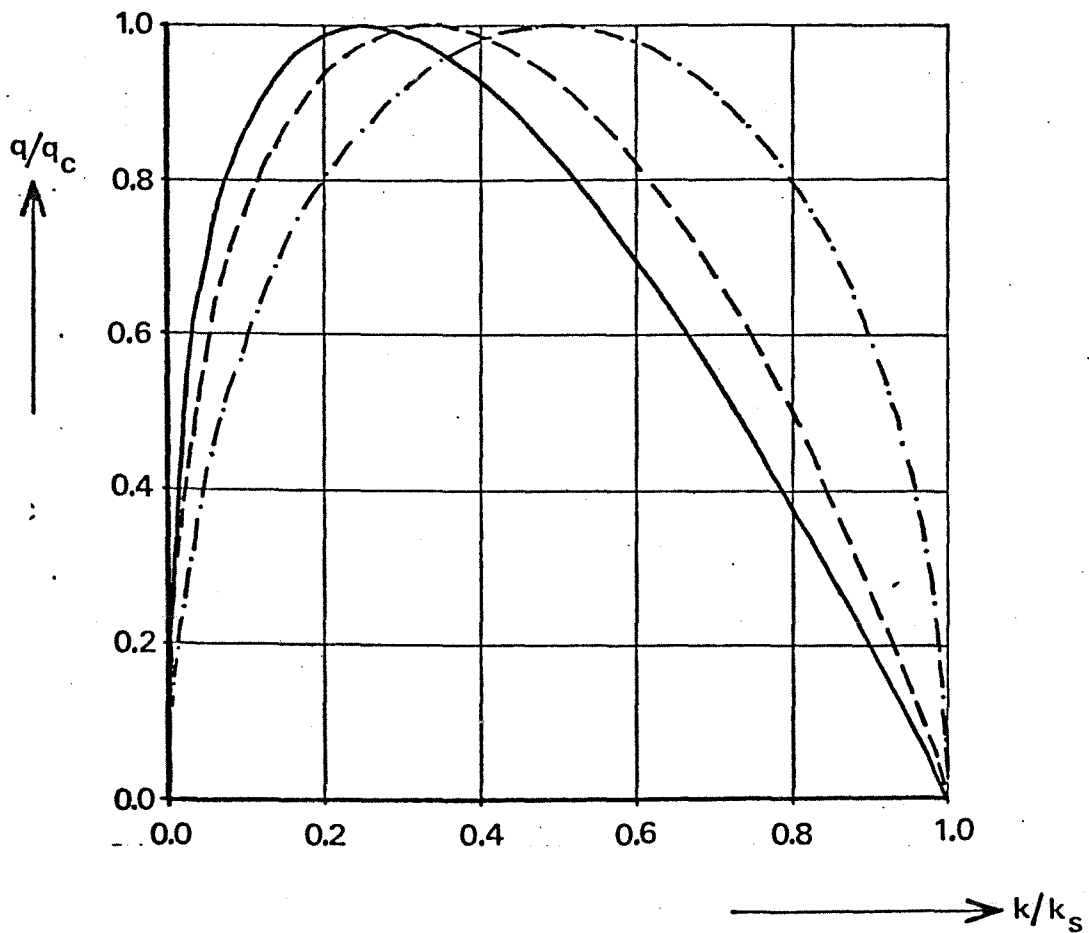
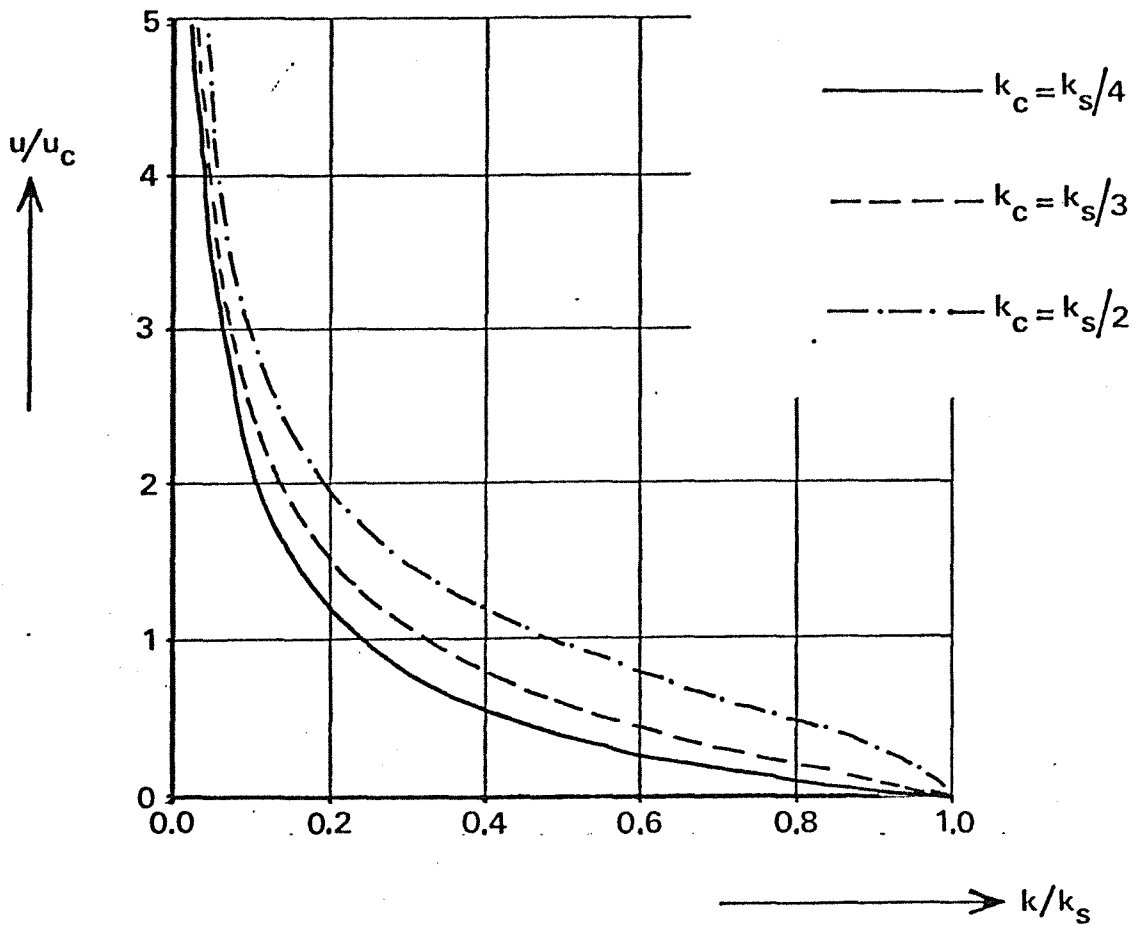
Afbeelding 4. Kansdichtheid van snelheden als functie van de dichtheid.



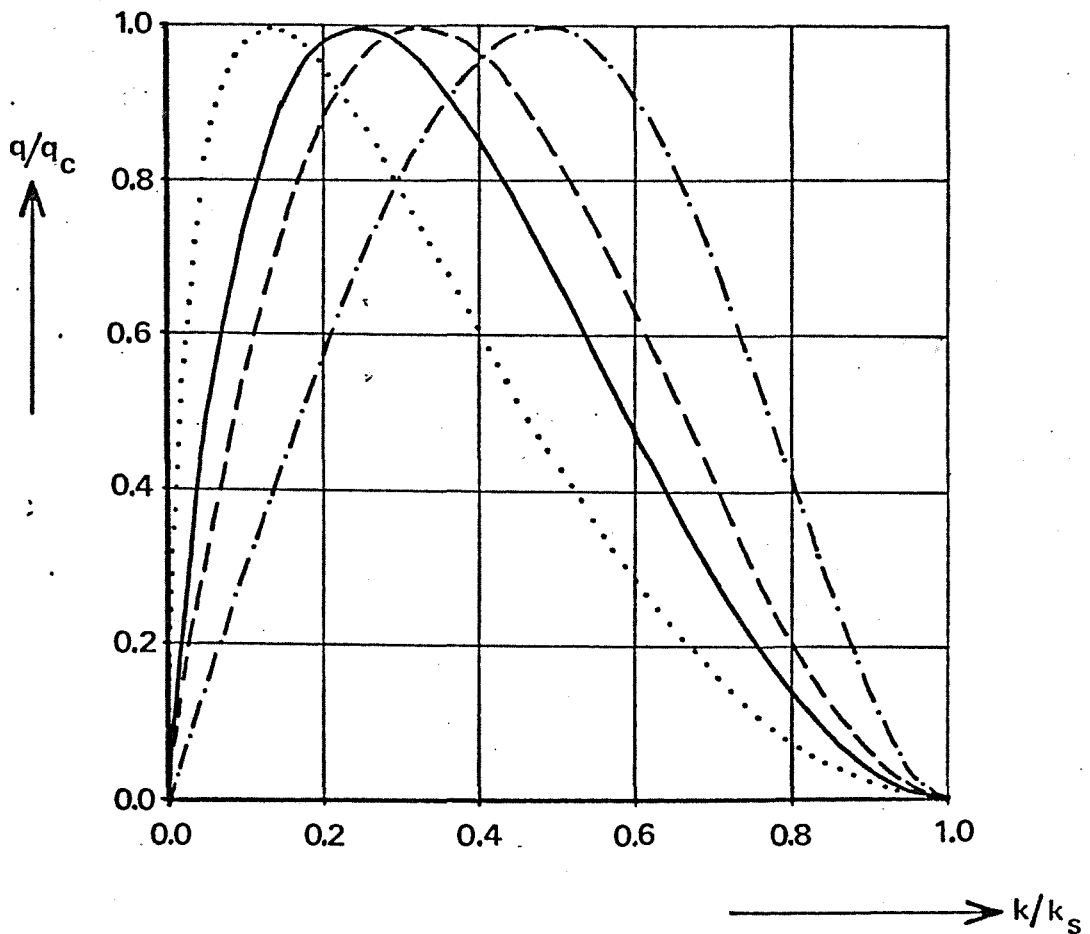
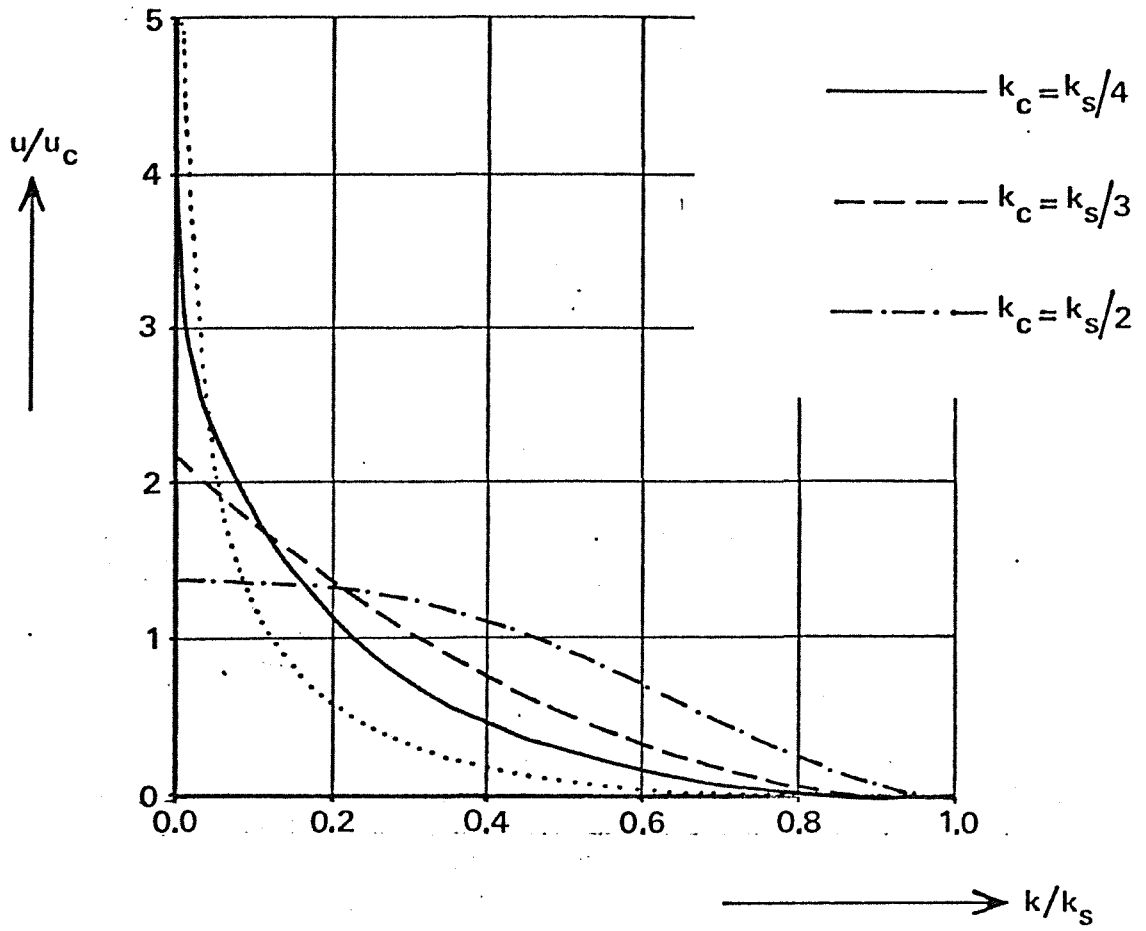
Afbeelding 5. Model van Haight.



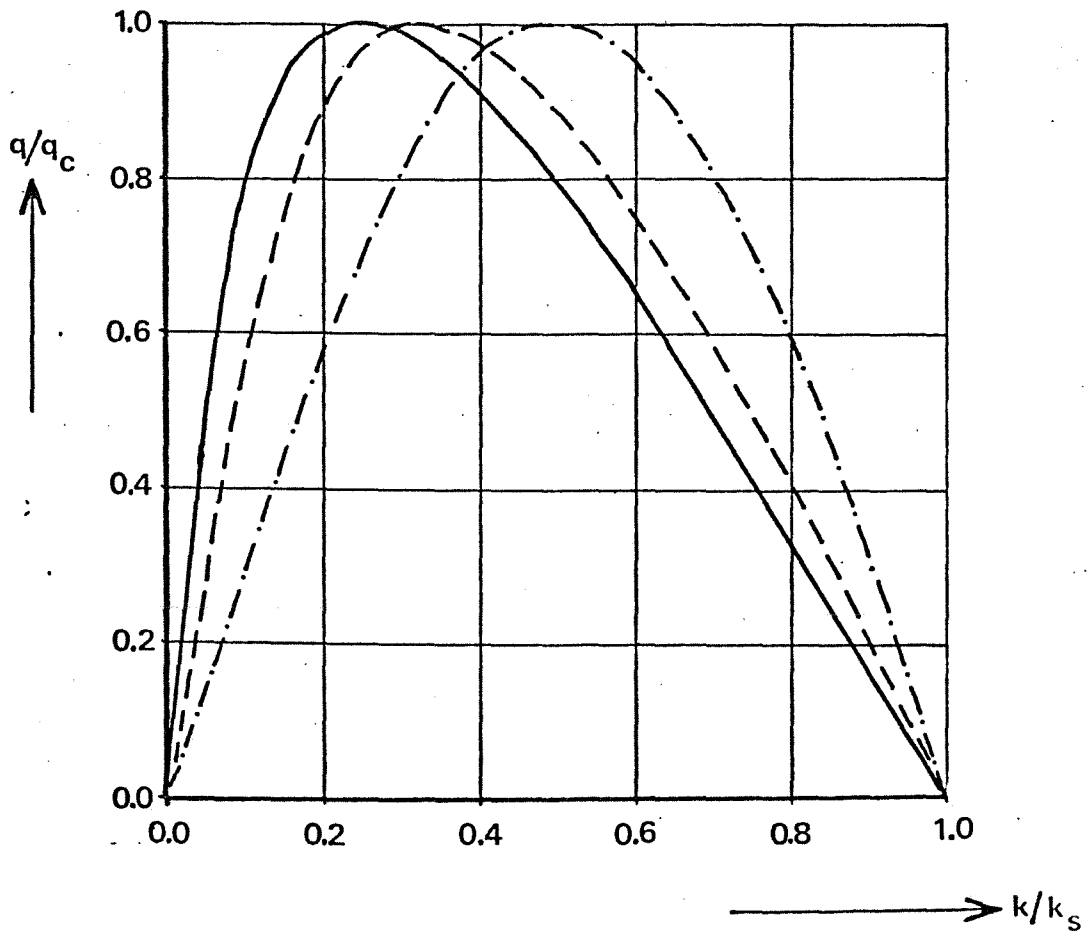
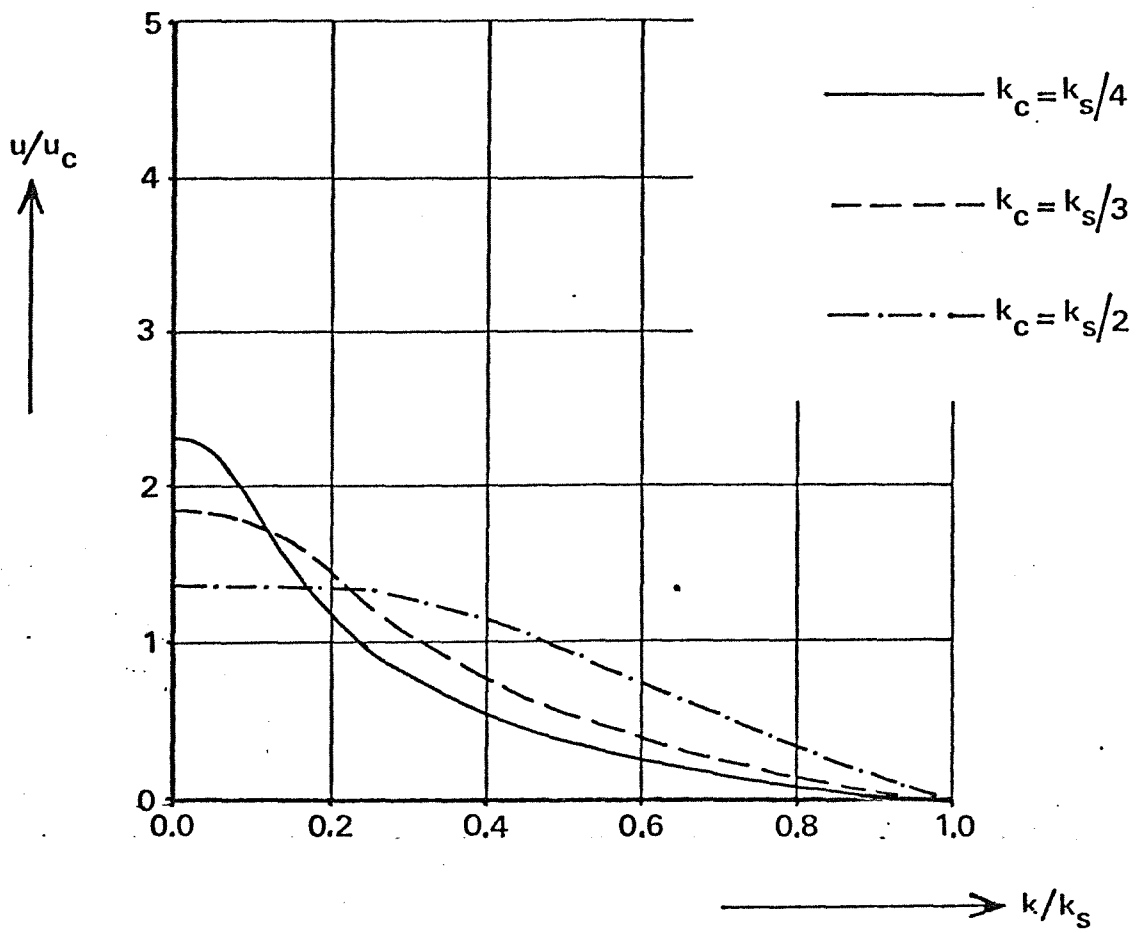
Afbeelding 6. Notatie bij het afstand houden.



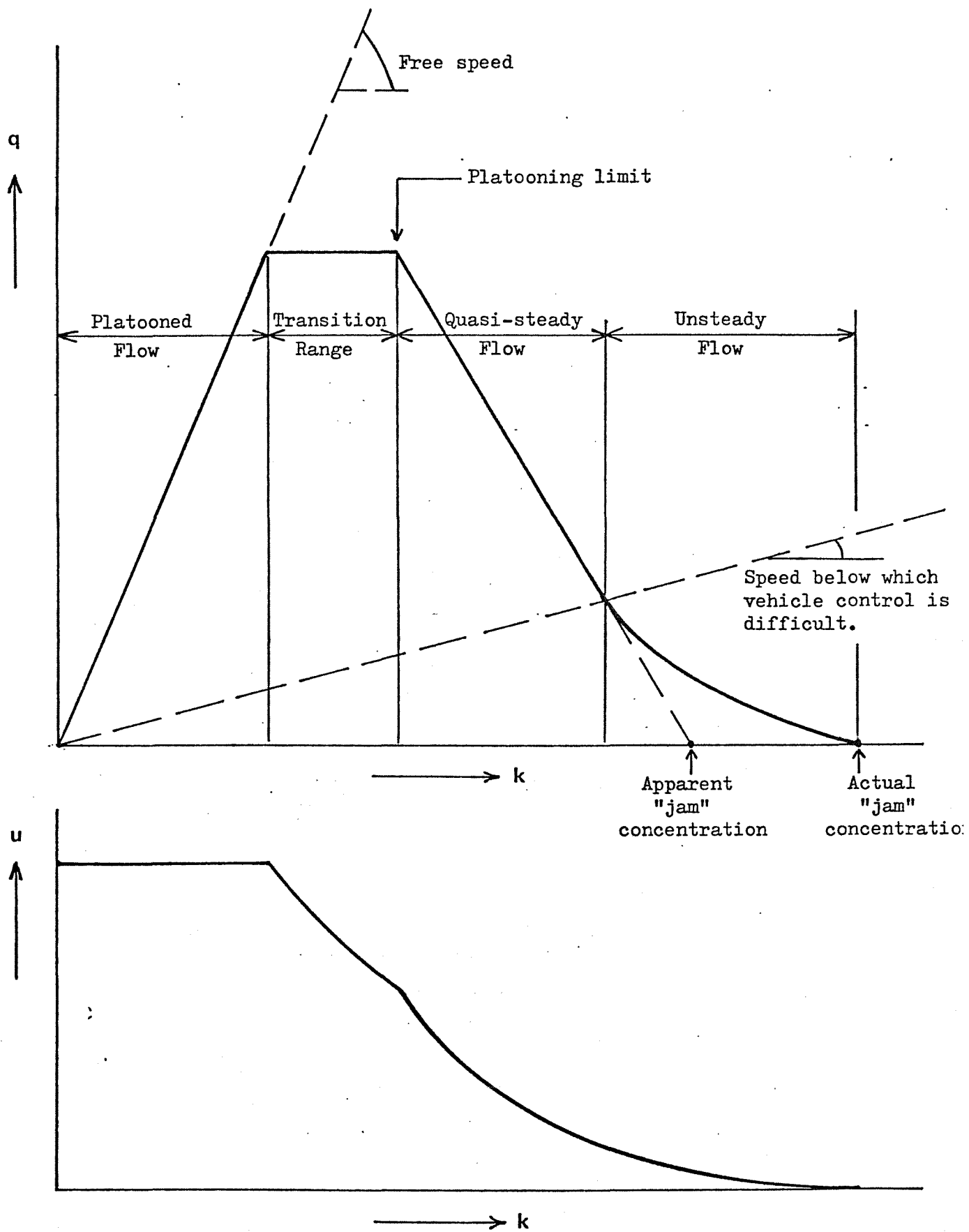
Afbeelding 7. Model afgeleid uit benodigde remweg.



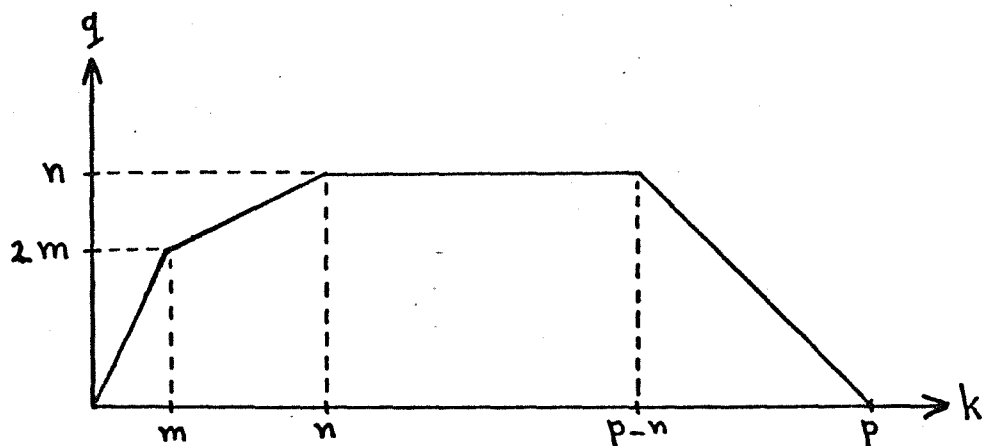
Afbeelding 8. Model afgeleid uit car-following model van Gazis.



Afbeelding 9. Model afgeleid uit car-following model van Franklin.

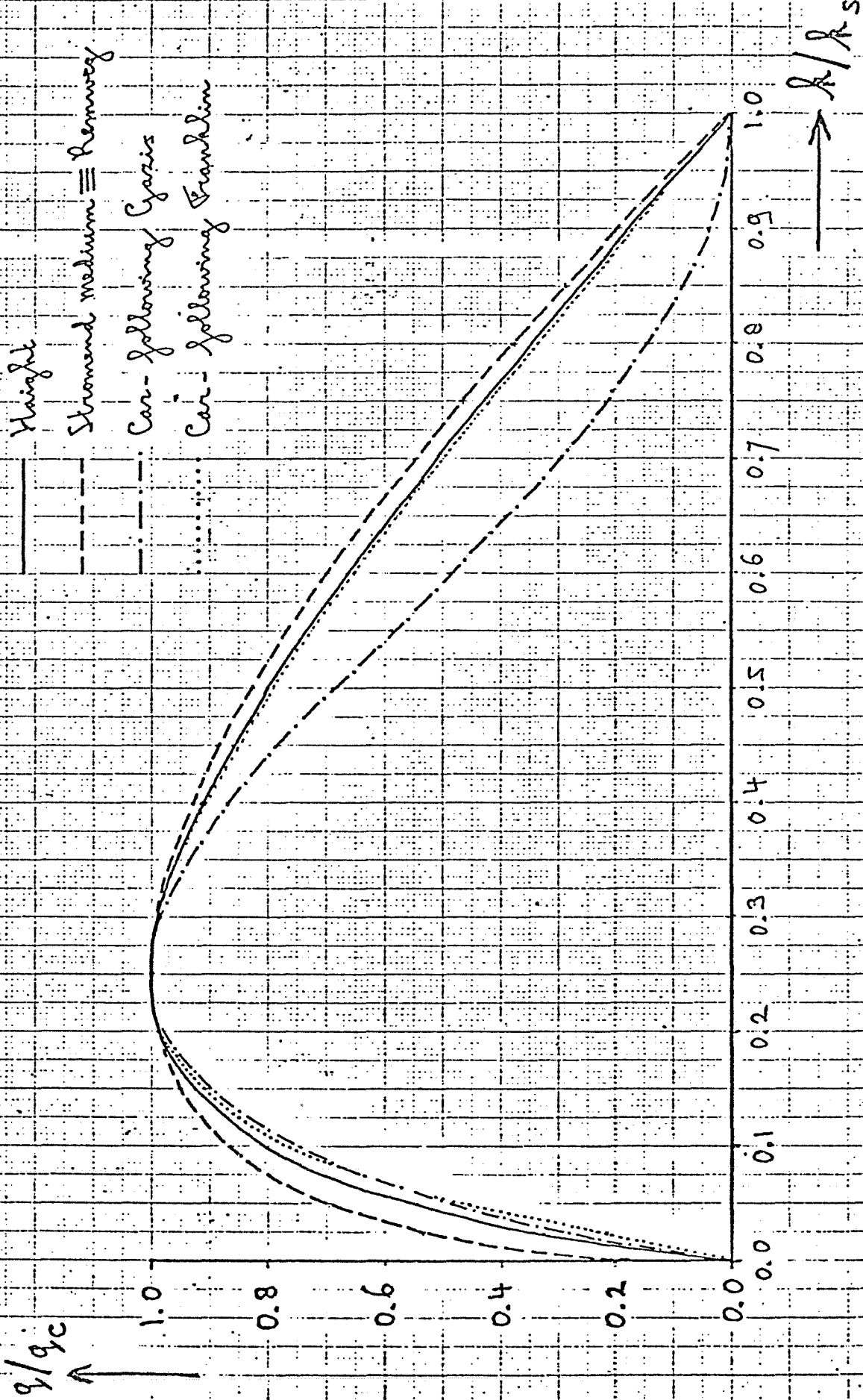


Afbeelding 10. Model van Franklin. Bron: Franklin(1965).



Afbeelding 11. Model van Fowkes. Bron: Fowkes(1972)

η/η_c ↑
 Haight
 Stream medium \equiv Remweg
 Car-following Gavis
 Car-following Franklin



Afbeelding 12a. Vergelijking modellen voor $k_c/k_s = 1/4$.

q/q_c
↑

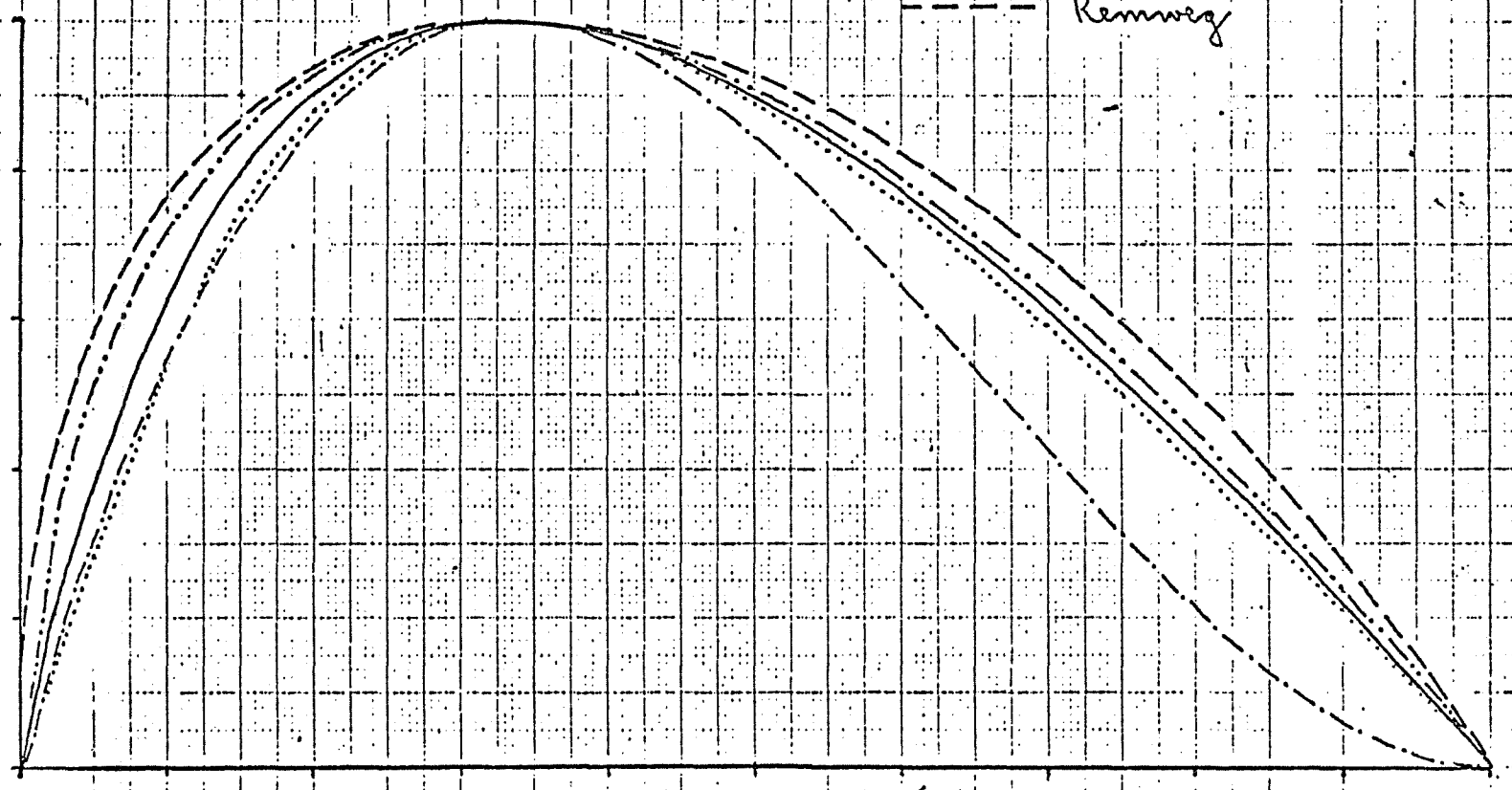
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0

0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

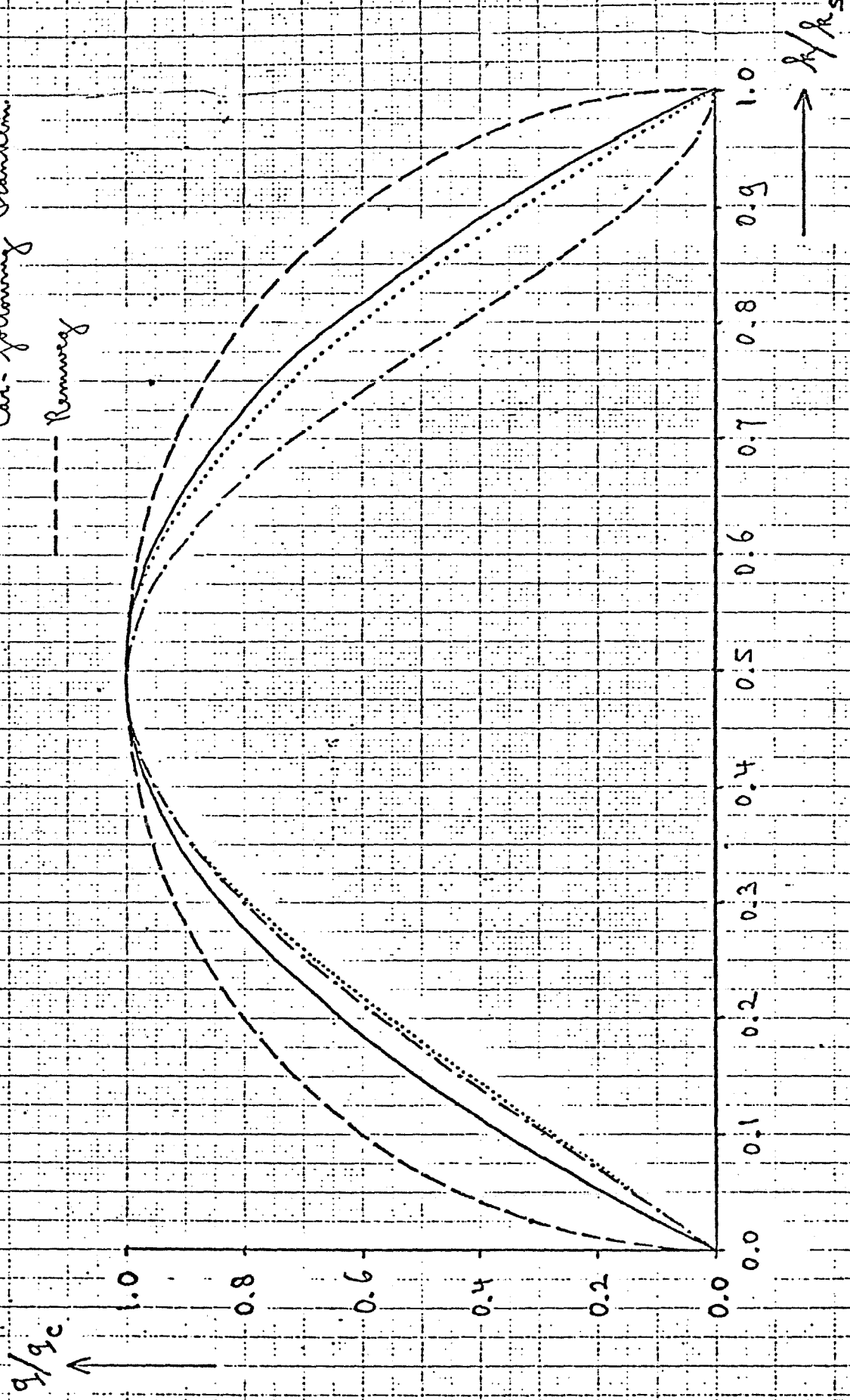
- Stromend medium
- - - Car-following Gzsis
- Car-following Franklin
- - - Remweg

→ h/h_s

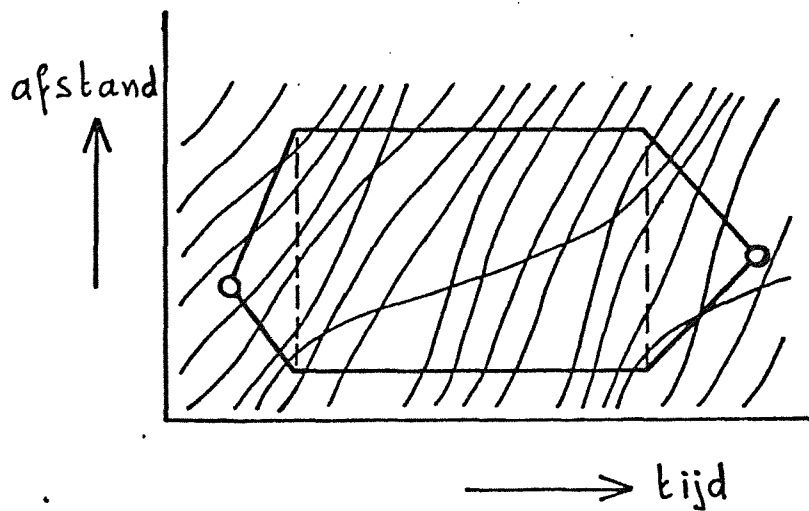
Afbeelding 12b. Vergelijking modellen voor $k_c/k_s = 1/3$.



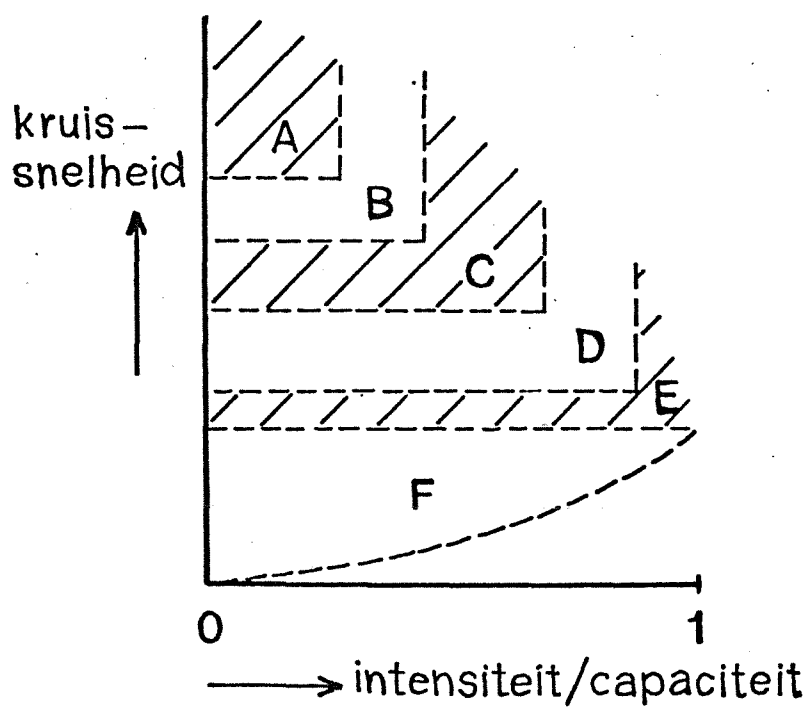
Grenshields \equiv Haigh \equiv Stromend medium
 Car-following Gasis
 Car-following Franklin
 Remweg



Afbeelding 12c. Vergelijking modellen voor $k_c/k_s = 1/2$.



Afbeelding 13. Meetmethode "gesloten trajectorie."



Afbeelding 14. Afwikkelingsniveau's. Bron: HRB(1965)

LITERATUUR

- Beckmann, H.; Jacobs, F.; Lenz, K.H. et al. Das Fundamentaldiagramm; eine Zusammenstellung bisheriger Erkenntnisse. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Heft 89. Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen. Köln, 1973.
- Bennett, T.H. Use of the moving-car observer method on one-way roads. Traffic Engineering & Control 16 (1975) (oct): 432-435.
- Breton, P. le. Approche des relation débit-vitesse en fonction des caractéristiques des routes en zone rurales. Communication OCDE-symposium sur la conception et les méthodes d'élaboration des normes géométrique routiers. Helsingør, 1976.
- Brilon, W. Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstrassen. Technische Universität, Karlsruhe, 1974.
- Brilon, W. Simulationsmodells für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Strassen mit Gegenverkehr. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 239. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1977.
- Ceder, A. A deterministic traffic flow model for the two-regime approach. Transportation Research Record 567. Transportation Research Board, Washington, 1976.
- Ceder, A. & May, A.D. Further evaluation of single- and two-regime traffic flow models. Transportation Research Record 567. Transportation Research Board, Washington, 1976.
- Deterne & Le Breton. Capacité des routes. Revue générale des routes et des aérodomes 49 (1975) 513 (Octobre) Supplément.
- Drew, D.R. Deterministic aspects of freeway operations and control. Highway Research Record 99. Highway Research Board, Washington, 1965.
- Duncan, N.C. Rural speed/flow relations. TRRL Lab. report 651. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1974.

- Duncan, N.C. A note on speed/flow/concentration relations. Traffic Engineering & Control 17 (1976) 1: 34-35.
- Edie, L.C. Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. Operations Research 9 (1961) 1 (jan/feb): 66-76.
- Flury, F.C. Het capaciteitsbegrip op de helling. Verkeerstechniek 23 (1972) 7: 316-323.
- Flury, F.C. Een beslissingsmodel voor beleidsmaatregelen. Intertrafic 1974. "Beheerst Verkeer". Definitief programma. Teksten lezingen. RAI, Amsterdam, 1974.
- Fowkes, N.D. Road traffic flow in urban centres - A new approach. Transportation Research 6 (1972) 3: 39-48.
- Franklin, R.E. The propagation of disturbances in a single lane of traffic. Civil Engineering and Public Works Review 57 (1962) (april): 487-489.
- Franklin, R.E. Further analysis of some experiments on single-lane traffic. RRL Note LN829. Road Research Laboratory, Crowthorne, 1965.
- Gazis, D.E.; Herman, R.; Rothery, R.W. Non-linear follow-the leader models of traffic flow. Operations Research 9 (1961) 4: 545-567.
- Gebhardt, D. Ein analytisches Warteschlangenmodell für den Verkehr auf Autobahnen. Zeitschrift für Operations Research, 16 (1972): 57-71.
- Greenberg, H. An analysis of traffic flow. Operations Research 7 (1959) 1: 79-85.
- Haight, F.A. Mathematical theories of traffic flow (hoofdstuk 3). Academic Press. London, 1963.
- Heere, E. & Akkerman, S. Verband tussen snelheid, dichtheid en intensiteit getoetst m.b.v. snelheids- en intensiteitsmetingen volgens de moving-observer methode. Verkeerstechniek 24 (1973) 5: 224-229.

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

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

Jones, E.R.; Goolsby, M.E.; Brewer, K.A. Effect of rain on freeway capacity. Texas A and M University, 1969.

Lighthill, M.J. & Whitham, G.B. On kinematic waves II. A theory of traffic flows on long crowded roads. HRB Special Report 79. Highway Research Board, Washington, 1964.

May, A.D. & Keller, H.E.M. Non-integer car-following models. Highway Research Record 199. Highway Research Board, Washington, 1964.

NEI. Integrale verkeers- en vervoersstudie. Annex 5 Optimalisering autowegennet. Nederlands Economisch Instituut. Rotterdam, 1972.

Payne, H.J. Model of freeway and traffic control. Simulation Council Proceedings. Mathematical Models of Public Systems, Vol. 1, no. 1 (1971) Chapter 6: 51-61.

Prigogine, I. & Herman, R. Kinetic theory of vehicular traffic. Elsevier, New York, 1971.

Rankine & Hill. Factors effecting travel speed on urban roads. ARR Report No. 26. Australian Road Research Board. Canberra, 1974.

Rørbech, J. Capacity and level of service conditions on Danish two-lane highways. Highway Research Record 398. Highway Research Board. Washington, 1972.

Stadsontwikkeling en Verkeersonderzoek. Het verband tussen snelheid en verkeersprestatie van auto's in Amsterdam. Amsterdam, 1975.

Stock, W.A.; Blankenhorn, R.C.; May, A.D. The "Freq. 3" freeway model. Freeway operation study - Phase III. University of California, Berkeley, 1973.

TEC. Design flow standards. Traffic Engineering & Control 15 (1974) 16/17 (aug/sept): 772.

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

Wiedemann, R. Simulation of traffic flow in bottle necks. Paper OECD-symposium on methods for determining geometric road design. Helsingør, 1976.

Wohl, M. & Martin, B.V. Traffic system analysis for engineers and planners (hoofdstuk 11). Mc. Graw Hill. New York, 1967.

Wright, C.C.; Hyde, T.; Holland, P.J.; Jackson, B.J. Estimating traffic speeds from flows observed at the ends of a road link. Traffic Engineering & Control 14 (1973) 10 (febr): 472-475.

Wright, C.C. A second method of estimating traffic speeds from flows observed at the ends of a road link. Traffic Engineering & Control 15 (1974) 9 (jan): 432-434.

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