

HET BASISDIAGRAM, EEN MACROSCOPISCH VERKEERSSTROOMMODEL

R-76-13

Ir. H. Botma

Voorburg, juli 1976

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Gepresenteerd wordt een literatuuroverzicht van het basisdiagram, d.i. de relatie die in evenwicht bestaat tussen twee van de drie verkeersstroomkenmerken intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid. Het basisdiagram wordt gedefinieerd en de betekenis ervan voor wegontwerp en verkeerskwaliteit wordt aangegeven. Daarnaast worden enkele toepassingen gegeven alsmede de theoretische en empirische stand van zaken. Van de onderzoekaspecten komen meetmethoden en analyse aan de orde.

SUMMARY

A literature review is presented of the fundamental diagram i.e. the relationship in a steady-state traffic flow between two of the three variables volume, density and mean speed. The fundamental diagram is defined and the importance for roadway design and traffic quality is explained.

In addition, a number of applications is given as well as the theoretical and empirical state of the art. Of the research aspects, measurement methods and analysis are treated.

Het artikel over het basisdiagram is gebaseerd op een literatuurstudie van verkeersstroomodellen die wordt uitgevoerd door de afdeling Theorievormend Onderzoek Pre-crashprojecten van de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV. Deze studie heeft tot doel de omvangrijke hoeveelheid literatuur over onderzoek naar verkeersstroomodellen in kaart te brengen en de relevantie ervan voor verkeersveiligheidsonderzoek na te gaan. Kennis van verkeersstromen is van groot belang als er, zoals in Nederland, steeds meer verkeer van een vrijwel niet meer groeiend wegennet gebruik moet maken en er dientengevolge behoefte ontstaat aan verkeersbeheersing.

Het project verkeersstroomodellen is een van de zogenaamde basisonderzoeken van de SWOV. Het is niet direct gericht op beleidsmaatregelen, maar het is nodig voor het beschrijven van het verkeersveiligheidsprobleem. Tevens heeft het theorievorming en verbetering van onderzoeksmethoden ten behoeve van toekomstig onderzoek tot doel.

1. INLEIDING

Bij de theorie en modellen van verkeersstromen staat de interactie tussen voertuigen centraal, gegeven de kenmerken van weg, bestuurders en voertuigen, en niet de interactie tussen een enkel voertuig en de weg. Men kan modellen op drie niveaus onderscheiden, gerangschikt naar toenemende detaillering: macro-, meso- en microniveau, die respectievelijk gaan over gemiddelde waarden van verkeersstroomkenmerken, verdelingen van verkeersstroomkenmerken rond hun gemiddelde waarde en individuele voertuigtrajectoriën. Ter toelichting het verkeersstroomkenmerk snelheid: op macro-niveau is dit de gemiddelde snelheid, bv. van de voertuigen die in een zekere periode een wegdoorsnede passeren; op mesoniveau is het de snelheidsverdeling; en op microniveau het snelheidsverloop van een verzameling voertuigen over een wegvak.

Voorafgaand aan de behandeling van het basisdiagram, dat een model op macroniveau is, eerst iets meer over de betekenis van de verkeersstroomtheorie in het algemeen.

Bij het ontwerp van wegen volgen uit de functie van de weg in het netwerk het type en de ontwerpsnelheid. Vele ontwerpnormen volgen uit modellen omtrent het gedrag van één voertuig op de weg. Bij gebruik van de weg wordt, naarmate de hoeveelheid verkeer toeneemt, de interactie tussen voertuigen van meer belang. Deze bepaalt mede de kwaliteit van het verkeer, waarvan de reistijd en de onveiligheid twee belangrijke aspecten zijn. Verkeersstroommodellen, die een beschrijving geven van de verschijnselen die dan optreden in termen van voertuigbewegingen, zijn nuttig voor het verkrijgen van inzicht. Dit kan leiden tot effectievere maatregelen, zowel op het gebied van wegontwerp in ruime zin als op het gebied van verkeersbeheersing. Maatregelen van het laatste type worden tot nu toe vaak als aanvulling beschouwd op een niet meer adequaat wegontwerp. Het lijkt beter reeds bij het wegontwerp rekening te houden met de mogelijkheden van verkeersbeheersing. Een voorbeeld hiervan is het verkeersstroommodel voor een deel van het

autosnelwegennet rond San Francisco (zie May, 1974), waarmee het effect van verbeteringen aan weg en toeritregelingen geïntegreerd wordt beschouwd.

Het te behandelen basisdiagram is een macroscopisch verkeersstroommodel; het is een weergave van relaties tussen intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid. De relaties zijn niet invariant, maar afhankelijk van bv. wegkenmerken. Voor een verklaring en voorspelling van de variaties zijn meer gedetailleerde verkeersstroommodellen en gegevens omtrent het gedrag van bestuurders nodig: perceptie, informatieverwerking, beslissing en handeling.

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 (space mean speed) en de kruissnelheid. Onder kruissnelheid wordt verstaan de gemiddelde snelheid over het wegvak, die bij gunstige weersomstandigheden 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. Rørbech, 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 gemiddelde snelheid over het wegvak. Gemakshalve wordt in hetgeen volgt deze gemiddelde snelheid aangeduid als snelheid.

Noem de intensiteit q , de dichtheid d en de snelheid u ; de drie basisdiagrammen zijn de functies $q(d)$, $u(d)$ en $u(q)$. Ze verlopen schematisch als in figuur 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 $u(d)$, 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 bestuurdersgedrag, zoals reisdoel;
- omstandigheden, zoals regen en duisternis.

Markante punten van de diagrammen zijn:

- vrije snelheid u_0 : de snelheid waarbij $q = 0$ en $d = 0$;
- capaciteit q_c , de maximale waarde van q ;
- kritische dichtheid d_c : de dichtheid waarbij $q = q_c$;
- kritische snelheid u_c : de snelheid waarbij $q = q_c$;
- stremmingsdichtheid d_j : de dichtheid waarbij $u = 0$ en $q = 0$.

Men kan de curven ook beschouwen als bovengrenzen van gemiddelde bestuurdersprestaties, die incidenteel 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.

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. Edie (1963) heeft definities geïntroduceerd waarbij alle drie de variabelen betrekking hebben op een wegvak en een tijdvak.

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

De sommatie wordt uitgevoerd over alle voertuigen in het beschouwde weg-tijdvak van afmeting X maal T ; x_i is de afgelegde afstand en t_i de verbruikte tijd van voertuig i (zie figuur 2). In feite zijn alleen de tijdstippen of posities op de randen van het beschouwde gebied al voldoende voor het uitvoeren van de sommaties; voertuig-trajectoriën noch voertuigidentificaties zijn nodig. Desondanks zijn

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

Brilon (1974) heeft intensiteiten en dichtheden lokaal en voor een weg-tijdvak geobserveerd op een landelijke tweestrooksweg. De lokale dichtheid is het quotiënt van intensiteit en harmonisch gemiddelde lokale snelheden. Hij vond een redelijke overeenstemming, wat te verwachten was, omdat het wegvak homogeen en de verkeersstroom vermoedelijk in evenwicht was.

Min of meer tegenover Edies aanpak 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 aan de dichtheid.

3. 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 ten dele 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 ontwerpssnelheid.

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 van de Highway Research Board (1965) is deze invloed operationeel gemaakt in de vorm van een aantal ontwikkelingsniveaus, die in volgorde van afnemende kwaliteit aangeduid worden met A, B, C, D, E en F (zie figuur 3).

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. Een uitzondering moet worden gemaakt voor de veiligheid, die nadere beschouwing verdient.

Uit Nederlands onderzoek blijkt dat op de autosnelwegen het ongevallenquotiënt (aantal ongevallen per voertuigkm) toeneemt naarmate het afwikkelingsniveau daalt (Beukers, 1974), maar dat op landelijke enkelbaanswegen een U-vormige relatie bestaat waarbij afwikkelingsniveau C optimaal is. Hierbij is het afwikkelingsniveau van het op 30 na drukste uur als representatief voor een jaar genomen.

Gedetailleerder onderzoek is verricht met alle uurwaarden in een bepaalde periode, waarbij op diverse landelijke wegtypen een U-vormige relatie is gevonden tussen intensiteit en ongevallenquotiënt (Gwynn, 1966 en 1970, Leutzbach, 1970 en 1973). Voor afwikkelingsniveau A t/m E is de intensiteit in de meeste gevallen een goede maatstaf.

In de stedelijke situatie zijn vooral kruisingen onderzocht. Leong (1973) constateert op grond van uitgebreide gegevens dat het aantal ongevallen per passerend voertuig constant tot licht dalend is bij toenemende gemiddelde etmaalintensiteit.

Over landelijke kruisingen en stedelijke aders is veel minder bekend, wat voor de eerste te verklaren is uit het relatief kleine aandeel in het ongevallengebeuren.

Concluderend kan gesteld worden dat het afwikkelingsniveau niet altijd een goede maatstaf is voor het kwaliteitsaspect veiligheid.

Onder andere op grond van beperkte financiële middelen bestaat de neiging ontwerpintensiteiten 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 snelheidsintensiteitscurve vermoedelijk vlakker wordt, zullen de reistijden daardoor 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 ontwerpintensiteiten op de veiligheid negatief zal zijn. Mocht dit zo zijn, dan zijn o.a. verkeersbeheersingssystemen 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).

4. ENIGE 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, 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 kinematische golven en schokgolven van Lighthill (1955) of het recentere dynamische model van Payne (1971), dan is het basisdiagram bruikbaar als onderdeel van het totale model.

5. HUIDIGE STAND VAN ZAKEN

5.1. Theoretisch

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

Vervorming vrije snelheidsverdeling

Haight (1963) veronderstelt dat de snelheidsverdeling voor dichtheid nul tot aan volledige stremming geleidelijk verandert en naar boven steeds meer begrensd wordt. Met behulp van een vrij willekeurige keuze van de theoretische snelheidsverdeling en de grenscurve valt hieruit een basisdiagram af te leiden, dat in principe voor alle dichtheden geldt.

Analogie verkeersstroom en stromend compressibel medium

Intensiteit, dichtheid en snelheid van de verkeersstroom worden opgevat als continue en differentieerbare grootheden. Verondersteld wordt een behoudswet voor de voertuigen, het bestaan van het basisdiagram en een relatie tussen de afgeleide van de snelheid naar de tijd en van de dichtheid naar de plaats. Hieruit valt de vorm van het basisdiagram af te leiden (zie bv. Drew, 1965). De derde veronderstelling geldt hoogstens vanaf een zekere dichtheid.

Analogie verkeersstroom en stroom van deeltjes

Gebruikmakend van technieken uit de statistische mechanica wordt een Boltzmann-achtige vergelijking opgesteld voor de snelheidsverdeling van voertuigen als functie van plaats en tijd (Prigogine, 1971). Een bijzondere oplossing van deze vergelijking is het basisdiagram, dat in principe voor alle dichtheden geldt. Voor het verkrijgen van een specifieke oplossing is de vrije snelheidsverdeling nodig.

Statisch afstand houden

In druk verkeer zullen bestuurders een zekere afstand tot hun voorligger aanhouden, die verondersteld wordt af te hangen van een responsietijd, de snelheid en de geschatte remvertraging van voorligger en eigen voertuig. Verder wordt aangenomen dat de hele verkeersstroom gerepresenteerd kan worden door een voertuig dat zich gemiddeld gedraagt. Door vervanging van microscopische afstand en snelheid door macroscopische dichtheid volgt hieruit een basisdiagram, dat in principe vanaf een bepaalde dichtheid geldt.

Dynamisch afstand houden

Een dynamische beschrijving van het volggedrag in druk verkeer wordt gegeven door de car-followingmodellen. Analooq aan het voorgaande geval wordt hieruit door overgang van microscopische naar macroscopische variabelen een basisdiagram afgeleid (zie bv. Gazis, 1961 en Ceder, 1974).

Genoemde modellen zijn een selectie uit een nog steeds groeiende verzameling. De eraan ten grondslag liggende theorieën zijn geen van alle afdoende geëvalueerd en de waarde van het afgeleide basisdiagram is overeenkomstig, zodat geen voorkeur aangegeven kan worden. Opmerkelijk is dat verschillende theorieën soms tot vrijwel, of zelfs exact, dezelfde diagrammen leiden.

Bij al deze modellen is het gedrag van de voertuigen sterk vereenvoudigd, waardoor ze met analytische methode hanteerbaar blijven. Mogelijkheden tot meer reële en dus meer complexe gedragsbeschrijvingen bieden de simulatiemodellen. Daarbij wordt het gedrag van vele voertuigen met behulp van een computer nagebootst. Met deze modellen is o.a. het basisdiagram af te leiden (Wiedemann, 1976).

5.2. Empirisch

De bestaande empirische kennis kan globaal als volgt samengevat worden.

De belangrijke parameter capaciteit is veelvuldig onderzocht. De

Highway Capacity Manual (HRB, 1965) geeft voor verschillende 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, 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. Meer hierover is te vinden in hoofdstuk 6.

Het effect van factoren als regen en duisternis is vrijwel niet onderzocht. Een uitzondering is het onderzoek van Jones (1969) naar het effect van regen op de capaciteit van een autosnelweg. Bij het ontwerp van wegelementen als bogen wordt meestal uitgegaan van een nat wegdek.

Speciale vermelding verdient de situatie bij een bottle-neck, 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 en Beckmann, 1973).

Ook op aders wordt in het gebied rond de kritische dichtheid wel een discontinuïteit gevonden (Ceder & May, 1974).

Algemeen geschikte mathematische modellen zijn nog niet gevonden. Voor het gebied tot aan de kritische dichtheid zijn lineaire en kwadratische relaties 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 voertuig- en 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. Vervolgonderzoek kan op zinvolle wijze beperkt en richting gegeven worden door de categorisering van wegen (Janssen, 1974).

Bij de interpretatie van de resultaten van onderzoek is de gevolgde onderzoeksmethode van groot belang. Daarom zal in het volgende hoofdstuk worden ingegaan op de inrichting van het onderzoek.

6. 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 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 afgeleide van het verticaal profiel) en bochtigheid (= gemiddelde afgeleide van het horizontaal profiel);
- Rankine (1974) construeert 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 is observatie op één doorsnede nog wel toelaatbaar maar voor de snelheden niet. Tenslotte dienen omstandigheden verzameld te worden. Daarbij valt te denken aan dag van de week en tijd van de dag (bepaalt globaal het reisdoel) en aan licht- en weersomstandigheden.

6.1. Meetmethoden

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.

Het valt buiten het kader van dit artikel 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.

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 'space mean speed' 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.

Waarnemen op twee wegdoorsneden

a) 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.

b) 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 (1955) 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.

Bewegende waarnemer ('moving observer')

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

Combinatie van vaste en bewegende waarnemers

a) '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.

b) Gesloten trajectorie (Wright, 1973; zie figuur 4). 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, zoals door Edie (1963) gedefinieerd, 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.

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.

6.2. Analyse

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 $q(d)$ en $q(u)$ ten onrechte afgevlakt worden. Om deze reden verdient bij de analyse het gebruik van de monotone basisdiagram $u(d)$ 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.

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.

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

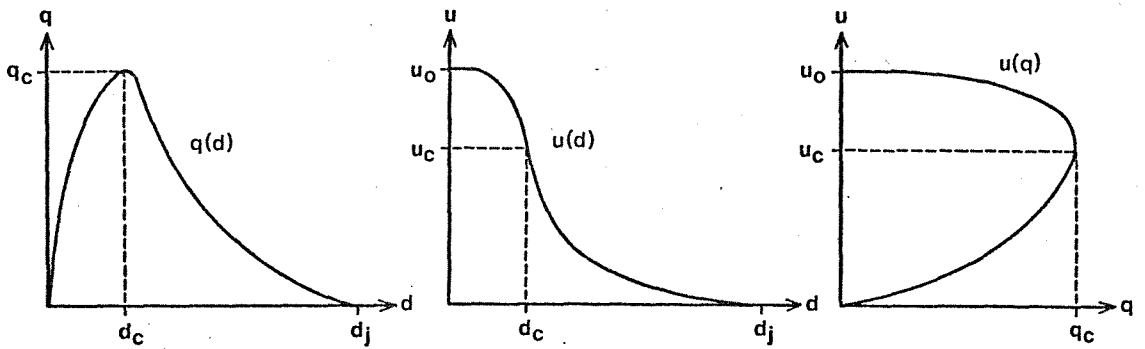
de data; dat het flexibel is (niet te weinig parameters); dat het eenvoudig is (bij voorkeur eenvoudige functies en gemakkelijk te schatten parameters); dat de parameters interpreteerbaar zijn in verkeerstermen.

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.

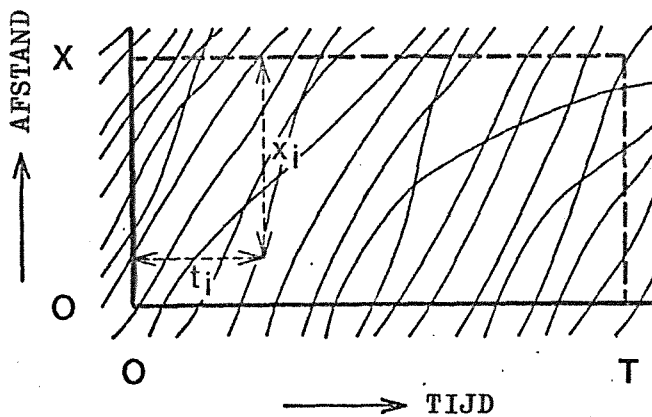
7. DISCUSSIE

Er bestaat in Nederland een streven naar een beter gebruik van de bestaande infrastructuur en naar een vermindering van de verkeers-
onveiligheid. Dit laatste kan o.a. bevorderd worden door per weg-
categorie een consistentere en beter voorspelbaar verkeersgedrag te
bewerkstelligen. Voor de realisering van de genoemde doelstellingen
is meer kennis van aspecten van het verkeersgedrag nodig, m.n. van
de rijtaak, van de interactie tussen voertuig en bestuurder en van
de interactie tussen voertuigen en globale verkeersstroomkenmerken;
dit alles in afhankelijkheid van weg- en voertuigkenmerken, maat-
regelen en omstandigheden. Het behandelde basisdiagram vormt hier-
toe een bijdrage; het is bruikbaar bij het ontwerp van wegen en ver-
keersbeheersingsmaatregelen. Er is echter nog niet voldoende kennis
over aanwezig, zodat nader onderzoek vereist is. Simulatiemodellen
lijken het meestbelovend.

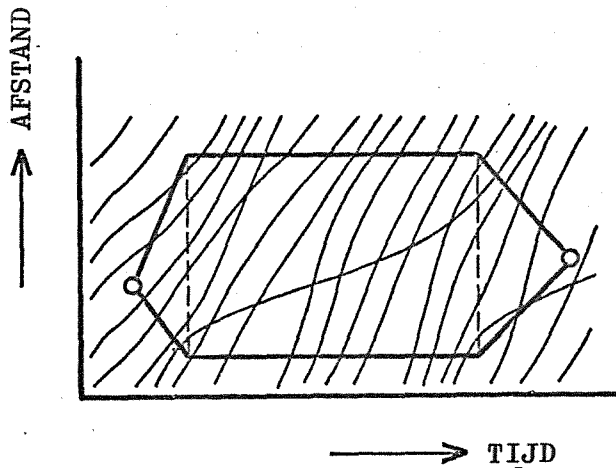
De relatie tussen het afwikkelingsniveau en de verkeerskwaliteit,
met name de veiligheid, moet verder onderzocht worden. Bedacht
moet worden dat de diverse relaties niet invariant zijn maar ge-
wijzigd kunnen worden door maatregelen die gericht zijn op de
mens (opleiding), het voertuig, de kenmerken van de weg en op rege-
lingen als verkeersbeheersing.



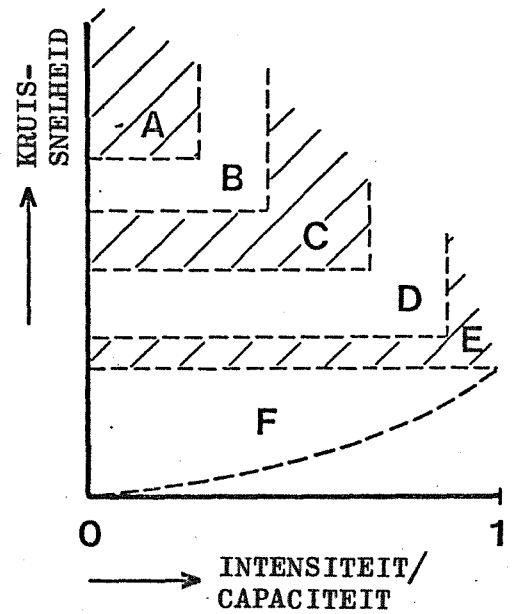
Figuur 1. De drie vormen van het basisdiagram



Figuur 2. Definities voor een weg-tijdvak



Figuur 4. Meetmethode "gesloten trajectorie"



Figuur 3. Schematische weergave ontwikkelingsniveaus (uit Highway Capacity Manual, 1965)

LITERATUUR

Beckmann, H. et al. Das Fundamentaldiagramm; eine Zusammenstellung bisheriger Erkenntnisse. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Heft 89. Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen, Köln, 1973.

Beukers, B. Verkeersbeïnvloeding op autosnelwegen. In: Intertraffic 74 "Beheerst Verkeer". Definitief programma; Teksten lezingen. RAI, Amsterdam, 1974.

Brilon, W. Relation between space-time parameters of traffic flow and locally determined parameters on two-lane rural highways. In: Transportation and Traffic Theory (ed. D.J. Buckley): 203-229. Elsevier, New York-London-Amsterdam, 1974.

Ceder, A. A deterministic traffic flow model for the two-regime approach. University of California, Berkeley, 1974.

Ceder, A. & May, A.D. Further evaluation of single- and two-regime traffic flow models. University of California, Berkeley, 1974.

Drew, D.R. Deterministic aspects of freeway operations and control. In: Highway Research Record nr. 99. Highway Research Board, Washington, 1965.

Duncan, N.C. Rural speed flow relations. TRRL Laboratory Report LR-651. Transportation 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: 66-76.

Edie, L.C. Discussion of traffic stream measurements and definitions. In: Almond, Proceedings II International symposium theory of road traffic flow. OECD, Paris, 1963.

Flury, F.C. Een beslissingsmodel voor beleidsmaatregelen. In: Intertraffic '74 "Beheerst Verkeer". Definitief programma; Teksten lezingen. RAI, Amsterdam, 1974.

Gazis, D.C. et al. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. Operations Research 9 (1961) 4: 545-567.

Gwynn, D.W. Relationship of accident rates and accident involvements with hourly volumes. New Jersey State Highway Department, Trenton, 1966.

Gwynn, D.W. & Baker, W.T. Relationship of accident rates with hourly traffic volumes. Traffic Engineering 40 (1970) 5 (febr): 42-44+47.

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

Haight, F.A. Mathematical theories of traffic flow. Academic Press, London, 1963.

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

Jones, E.E. & Goolsby, M.E. Effect of rain on freeway capacity. Texas A and M University, 1969.

Leong, H.J.W. Relationship between accidents and traffic volumes at urban intersections. Journal of the Australian Road Research Board 5 (1973) 3 (okt): 72-90.

Leutzbach, W. et al. Über den Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen und Verkehrsbelastung auf einem deutschen Autobahnabschnitt. Accident Analysis and Prevention 2 (1970) 2(dec):93-102.

Leutzbach, W. Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen und Verkehrsbedingungen auf zweispurigen Landstrassen. Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr, Karlsruhe, 1973.

Lighthill, G. On kinematic waves; A theory of traffic flow on long crowded roads. Proc. Roy. Soc. Series A (1955) 229: 317-45

May, A.D. Optimization techniques applied to improving freeway operations. University of California, Berkeley, 1974.

NEI. Integrale verkeers- en vervoersstudie. Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam, 1972.

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

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

Rankine & Hill. Factors affecting 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 No. 398: 37-47. Highway Research Board, Washington, 1972.

Stock, W.A. et al. The "FREQ 3" freeway model. Freeway operations study. Phase III. University of California, Berkeley, 1973.

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

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

Wright, C.C. et al. 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.