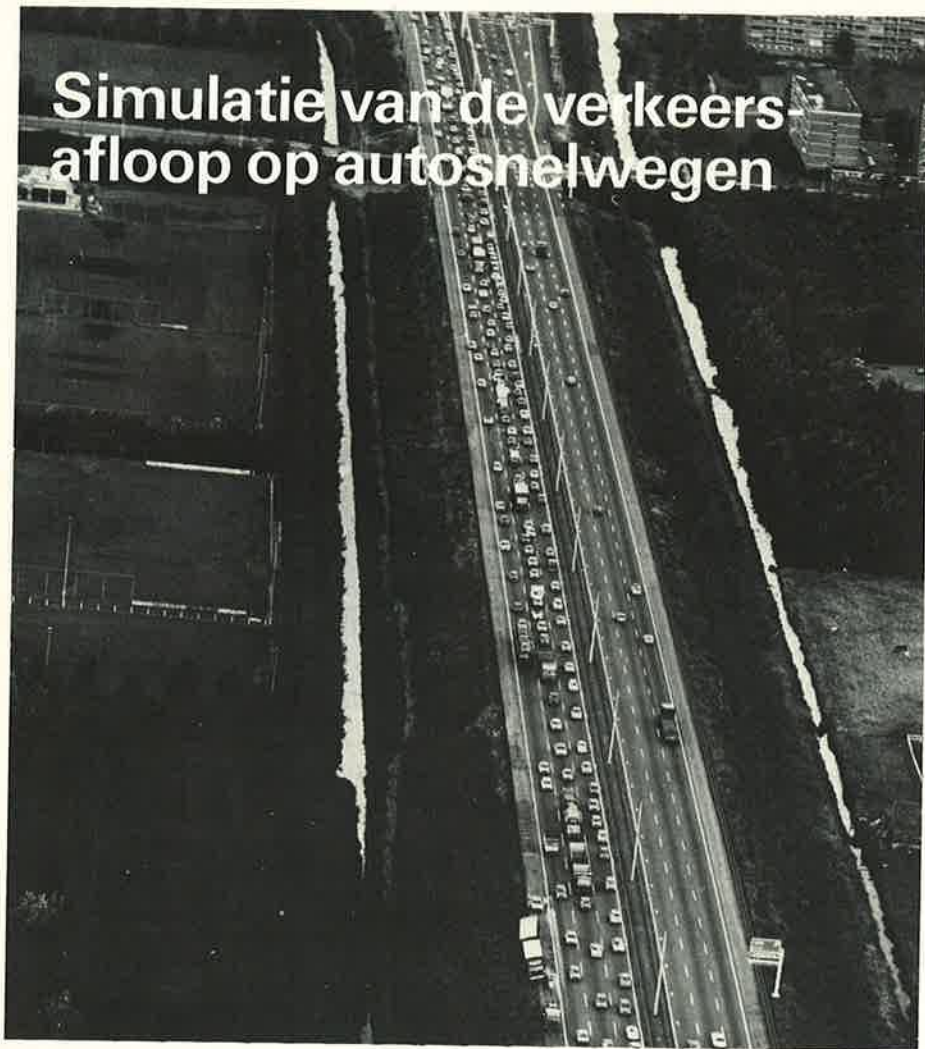


Simulatie van de verkeersafloop op autosnelwegen



Ir. L. H. Immers
Technische Hogeschool Delft, Afdeling
der Civiele Techniek

1. Inleiding

Dagelijks worden duizenden automobilisten tijdens de ochtend- en avondspits geconfronteerd met filevorming ter hoogte van de knelpunten in het Nederlandse autosnelwegennet.

Wekelijks worden dezelfde automobilisten en alle overige Nederlanders via de media door diverse belangengroeperingen in allerlei toonaarden met betrekking tot dit fileprobleem bewerkt.

Maandelijks verschijnen de statistieken verkeer en vervoer van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), waaruit blijkt, dat de auto-verkopen vergeleken met de voorgaande periode weer zijn toegenomen.

Jaarlijks wordt het uitvoeringsprogramma rijkswegen, gebaseerd op het Rijkswegenplan 1968, bijgesteld. Aanvankelijk geprojecteerde rijkswegen worden in de ijskast gezet, tot grote ergernis van de voor de belangen van de automobilist opkomende groeperingen.

Om de vier jaar worden parlementsverkiezingen gehouden, hetgeen veelal resulteert in een nieuw kabinet, een nieuwe minister van Verkeer en Waterstaat en een wijziging van het beleid.

Enige jaren geleden werd ons nog onder het oog gebracht, dat we met files moeten leren leven. Ondanks alle hierboven geschetste ontwikkelingen is volgens de huidige minister van Verkeer en Waterstaat het oplossen van het fileprobleem een kwestie van tijd. Op

grond van welke gegevens de minister tot een dergelijke uitspraak is kunnen komen (maar ook zijn voorganger) is raadselachtig indien men bedenkt, dat over de omvang van het fileprobleem in Nederland vrijwel geen exacte gegevens bekend zijn (1) en dat het wetenschappelijk onderzoek in Nederland met betrekking tot deze problematiek nog nauwelijks van de grond is gekomen.

Daarbij komt, dat de soort maatregel, die de minister voor ogen staat, beperkt blijft tot het aanpassen van de capaciteit van de autosnelweg. Hieronder wordt verstaan: aanleg van nieuwe wegen, bruggen, extra rijstroken, ruimere dimensionering knooppunten etc.

In de Verenigde Staten werd men een tiental jaren geleden met het hierboven geschetste probleem geconfronteerd. In plaats van een voortdurend vergroten van de capaciteit van de infrastructuur heeft men daar gezocht naar mogelijkheden om deze traditionele methode te vervangen door een methode, waarbij meer ingespeeld wordt op de vraag. Dit resulteerde in een groot aantal, vaak minder ingrijpende maatregelen, samengebracht onder de noemer „Transportation System Management” (2, 3, 4, 5).

Maatregelen behorende tot deze nieuwe methode zijn o.a. verhoging van de bezettingsgraad van auto's (car-pooling), bevordering gebruik openbaar vervoer (busbanen), aanleg verkeerssignaliserings- of regelsystemen, dosering van auto's op toeritten van autosnelwegen, etc. In het kader van deze gewijzigde probleembenadering werden eveneens nieuwe modellen ontwikkeld o.a. door May (6, 7, 8) en Payne (9). Het laatstgenoemde model is verder uitgewerkt door Cremer (10).

In oktober 1977 heeft prof. May in de vorm van een workshop (11, 12) het onder zijn leiding

aan de universiteit van Californië ontwikkelde **FREQ 4CP** programmapakket aan een dertigtal deelnemers uit zes Europese landen gepresenteerd.

Dit programmapakket is opgebouwd uit een simulatiemodel en een optimalisatiemodel. In het eerste model wordt de verkeersafloop op een autosnelweg gesimuleerd als functie van het vraagpatroon en de geometrie (het ontwerp) van de weg. In het optimalisatiemodel wordt afhankelijk van een nader te specificeren doelstellingsfunctie (zie 2.2) een optimale regelstrategie voor het toelaten van auto's op de autosnelweg bepaald.

In vervolg op de workshop is besloten door middel van een onderzoek na te gaan in hoeverre het programmapakket gebruikt zou kunnen worden voor simulatie en optimalisatie van de verkeersafloop op het Nederlandse autosnelwegennet en dan met name daar, waar veelvuldig filevorming optreedt. In overleg met de Rijkswaterstaat is gekozen voor het traject Zoetermeer-Den Haag (A12).

In deze bijdrage zullen, voorafgegaan door een globale behandeling van de theoretische achtergronden van het model, de resultaten van het onderzoek worden gepresenteerd. Het onderzoek werd uitgevoerd door de Technische Hogeschool te Delft.

Het **FREQ 4CP** programmapakket is op de computer (IBM 370/158) van het rekencentrum van de TH geïnstalleerd (taal: FORTRAN).

2. Het programmapakket **FREQ 4 CP**

2.1. Algemeen

FREQ 4CP is een macroscopisch, deterministisch model. Macroscopisch houdt in, dat niet naar het individuele gedrag van de voertuigen op de weg wordt gekeken, maar het verkeer als een stromend medium wordt beschouwd (analogie met modellen uit de vloeistofmechanica).

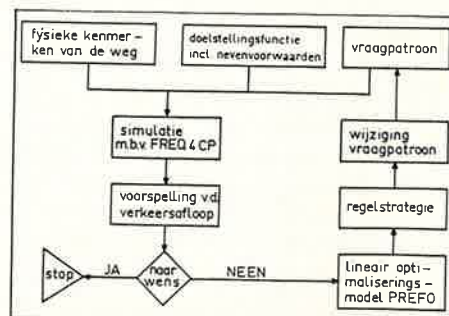
Deterministisch houdt in, dat de waarden van de invoervariabelen van het model eenduidig zijn vastgelegd (geen loting uit een verdeling). Een gevolg van deze opzet is de relatieve eenvoud van het model, mede waardoor het rekenproces op een snelle wijze kan worden doorlopen.

Het **FREQ 4CP** programmapakket is in de eerste plaats ontwikkeld teneinde te kunnen beschikken over een stuk gereedschapten behoeve van de beheersing van de verkeersafloop op autosnelwegen. Daarnaast kan gebruik gemaakt worden van het pakket bij het onderbouwen van de besluitvorming in het verkeerskundige planningproces. Het programmapakket is opgebouwd uit twee modellen:

- Het simulatiemodel **FREQ 4** (13)
- Het optimalisatiemodel **PREFO** (14)

In het simulatiemodel wordt de verkeersafloop op een autosnelweg gesimuleerd als functie van twee groepen variabelen: de fysie-

1. Modellen en planningsproces.



ke kenmerken van de weg en de vorm van de vraagfunctie.

In het optimalisatiemodel kan, indien gekozen is voor een bepaalde strategie met betrekking tot de beheersing van de verkeersafloop, de regeling daarvan geoptimaliseerd worden aan de hand van een viertal doelstellingsfuncties (zie 2.2).

2.2 Modelstructuur

In figuur 1 is weergegeven op welke wijze beide modellen in het verkeerskundige planingsproces kunnen worden ingebouwd. In de eerste plaats zal daarbij een simulatie van de verkeersafloop op het te onderzoeken traject worden uitgevoerd. Alle invoergegevens komen overeen met de bestaande situatie. Afhankelijk van de uitkomsten van het simulatiemodel wordt met behulp van het optimalisatiemodel een zo goed mogelijke regelstrategie bepaald voor de toeritten van de autosnelweg. Op de toeritten dienen daartoe de nodige voorzieningen te worden aangebracht.

Bij de optimalisatie kan door de gebruiker een keuze gemaakt worden uit een viertal doelstellingsfuncties:

1. Maximalisatie van het aantal op de autosnelweg toe te laten voertuigen;
2. Maximalisatie van het aantal voertuigkilometers op de autosnelweg (traject);
3. Maximalisatie van het aantal op de autosnelweg toe te laten personen;
4. Maximalisatie van het aantal personenkilometers op de autosnelweg (traject).

Een belangrijke randvoorwaarde, die van kracht is tijdens het optimalisatieproces luidt, dat op geen enkele sectie (i) van het te onderzoeken traject de vraag V_i de capaciteit C_i mag overschrijden ($V_i \leq C_i$).

Een gevolg van de met behulp van het model bepaalde regelstrategie kan zijn dat het vraagpatroon een wijziging ondergaat. Automobilisten kunnen gebruik gaan maken van parallelle routes (spatial shift) of andere vervoerwijzen (modal shift). Een volgende stap bij het gebruik van de modellen is dan ook een hernieuwde simulatie van de verkeersafloop uitgaande van de in het optimalisatiemodel bepaalde regelstrategie en het gewijzigde vraagpatroon.

Dit proces kan een aantal malen doorlopen worden, totdat de verkregen resultaten naar wens zijn.

2.3 Onderstellingen en uitgangspunten

In het voorgaande is reeds gesteld, dat het hier een macroscopisch deterministisch model betreft. Bovendien wordt uitgegaan van een aantal basisonderstellingen, te weten:

- a) De tijdas wordt verdeeld in een aantal discrete gelijke tijdsintervallen. Per tijdsinterval treedt geen wijziging op in de vervoersvraag, met andere woorden het vraagpatroon blijft constant;
- b) Het te onderzoeken traject wordt verdeeld in een aantal wegvakken (secties). De secties

kunnen van ongelijke lengte zijn. De capaciteit van een sectie is gedurende de gehele te simuleren tijdsperiode constant.

c) De verkeersstroom wordt beschouwd als een samendrukbaar medium en niet als een aantal afzonderlijke voertuigen.

d) Per tijdsinterval geldt: Input = Output. Het verkeer, dat gedurende één tijdsinterval een bepaalde sectie binnenkomt, zal in hetzelfde tijdsinterval de sectie verlaten (uitgezonderd indien files optreden). Er wordt ondersteld, dat de voorplantingssnelheid van de vraag oneindig groot is.

e) Beperkingen van de door de gebruiker opgegeven capaciteiten van de secties met bijbehorende in- en uitvoegstroken, als gevolg van invoegen, uitvoegen en weven, worden berekend volgens de in de HCM(15) aangegeven methodes.

2.4 Benodigde gegevens

De voor het model benodigde invoergegevens kan men in twee categorieën onderverdelen:

- Gegevens, die betrekking hebben op de fysieke kenmerken van het traject,
- Gegevens, die betrekking hebben op het vraagpatroon.

De eerste groep betreft voornamelijk gegevens, die de capaciteit beïnvloeden, zoals:

- aantal secties
- lengte van de secties
- aantal rijstroken per sectie
- breedte van de rijstroken
- capaciteit van de secties
- ontwerpnelheid van de secties
- hellingsgraad en boogstraal

Voor wat betreft de in- of uitvoegpunten zijn de volgende gegevens van belang:

- plaats van in- of uitvoegpunten
- aantal rijstroken per in- en uitvoegpunt
- de capaciteiten van de in- of uitvoegpunten
- Indien dosering van voertuigen zal plaatsvinden, dienen de grenzen (maximale en minimale intensiteit) opgegeven te worden, waarbinnen de dosering zal plaatsvinden.

Wat de gegevens, die betrekking hebben op het vraagpatroon betreft is al in onderstelling a (paragraaf 2.3) gesteld, dat binnen een tijdsinterval geen wijziging optreedt in het vraagpatroon.

Per tijdsinterval dienen de volgende gegevens te worden ingevoerd:

- Een herkomst en bestemmingstabel (H-B matrix). Herkomsten zijn alle punten, waar verkeer op de autosnelweg wordt toegelaten (inclusief het beginpunt van het te onderzoeken traject). Bestemmingen zijn alle punten, waar verkeer de autosnelweg verlaat (inclusief eindpunt van het te onderzoeken traject).
- De bezettingsgraad van auto's en bussen bij elk in- of uitvoegpunt.

Daarnaast dient voor de gehele te simuleren periode per sectie het procentuele aandeel van het vrachtverkeer te worden opgegeven. In paragraaf 2.3 is onder punt b reeds gesteld, dat het traject verdeeld wordt in secties. Dit geschiedt op grond van twee criteria, tevens belangrijke eigenschappen van een sectie:

- a) De capaciteit van de sectie is over de gehele lengte van de sectie constant.
- b) Per tijdsinterval is het vraagpatroon van een sectie constant (zie onderstelling a in paragraaf 2.3).

De grenzen tussen de secties worden dan ook hoofdzakelijk gevormd door begin- of eindpunten van hellingen of bogen, wijzigingen in het aantal rijstroken of de rijstrokbreedte (criterium a) of door in- en uitvoegpunten (criterium b).

2.5 De uitvoer

De uitvoer bestaat uit een groot aantal tabellen (deels facultatief), waarin de uitkomsten van de in het simulatiemodel en het optimali-



satiemodel uitgevoerde berekeningen worden afgedrukt.

De tabellen bevatten overzichten van de gesimuleerde verkeersafloop op de autosnelweg, zowel voor als na optimalisatie, eventueel uitgesplitst naar tijdsinterval.

Tevens kan een overzicht worden verstrekt van het waardebereik van een aantal variabelen gedurende de simulatie, zoals:

- gemiddelde snelheid
- dichtheid van de verkeersstroom
- lengte van de file
- benuttingsgraad (q/c) per sectie
- benzineverbruik
- emissie koolwaterstoffen, koolmonoxide, stikstofoxide

Van de door middel van het optimalisatieproces berekende regelstrategie bij de invoegpunten kan eveneens een overzicht worden verstrekt.

3. Structuur van het simulatiemodel

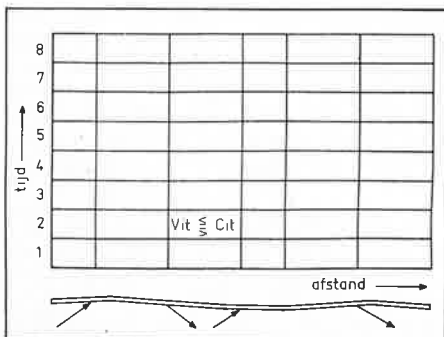
In het simulatiemodel wordt de verkeersafloop op de autosnelweg gesimuleerd. In figuur 2 is schematisch weergegeven op welke wijze dit geschiedt.

Op de horizontale as zijn de secties weergegeven, waaruit het te onderzoeken traject is opgebouwd. Op de verticale as is de tijdsperiode weergegeven, waarover gesimuleerd wordt. De tijdsperiode is verdeeld in een aantal gelijke tijdsintervallen (bijvoorbeeld 10 min. of 15 min.).

In het model wordt het diagram, dat aldus is ontstaan, in de volgorde van links naar rechts (rijrichting) en van beneden naar boven (tijd) doorlopen. Per cel (vraagpatroon en capaciteit zijn constant) wordt een aantal berekeningen uitgevoerd. Deze berekeningen zijn ondergebracht in vijf afzonderlijke submodellen, die sequentieel en zonder terugkoppeling worden doorlopen, te weten:

- a) Detectie en berekening van filevorming op de invoegstrook.
- b) Detectie en berekening van filevorming op de hoofdrijbaan ten gevolge van invoegen.
- c) Herberekening van de capaciteit van de hoofdrijbaan als gevolg van weven (facultatief).
- d) Berekening van de verkeersafloop op de hoofdrijbaan (detectie van files, berekening van de lengte van de files, de snelheid van de schokgolf, de rijnsnelheid etc.).

2. Afstand-tijd diagram.



e) Detectie en berekening van filevorming op de uitvoegstrook.

Binnen het bestek van deze bijdrage zal niet verder worden ingegaan op de theoretische achtergronden van de vijf submodellen. Hier-voor zij verwezen naar Stock et al. (6) en de HCM (15).

De vijf submodellen worden sequentieel doorlopen. Dit betekent, dat de uitkomsten van bepaalde berekeningen niet meer van invloed kunnen zijn op reeds uitgevoerde berekeningen in voorafgaande submodellen. In werkelijkheid zullen de in de vijf bovengenoemde submodellen ondergebrachte berekeningen elkaar zeer zeker beïnvloeden (bijvoorbeeld indien sprake is van filevorming op de hoofdrijbaan ter hoogte van een invoegstrook). De berekeningen dienen dan ook in onderlinge samenhang te worden uitgevoerd (bijvoorbeeld een iteratief proces). Omwille van beperking van de rekentijd is hier echter van afgezien.

Het kernpunt van alle per cel uitgevoerde berekeningen wordt gevormd door de vergelijking van vraag (vraagpatroon V_{it}) en aanbod (capaciteit C_{it}).

Indien $V_{it} \leq C_{it}$, dan vormt sectie i geen knelpunt. De verkeersstroom zal gelijk zijn aan V_{it} . Indien $V_{it} > C_{it}$, dan vormt sectie i wel een knelpunt. De verkeersstroom zal nu gelijk zijn aan C_{it} .

Voor het knelpunt zal een file ontstaan ($V_{it} - C_{it}$) vergezeld van een schokgolf tegen de rijrichting in. Als gevolg hiervan dienen in de secties voorafgaande aan het knelpunt alle berekeningen hernieuwd te worden uitgevoerd.

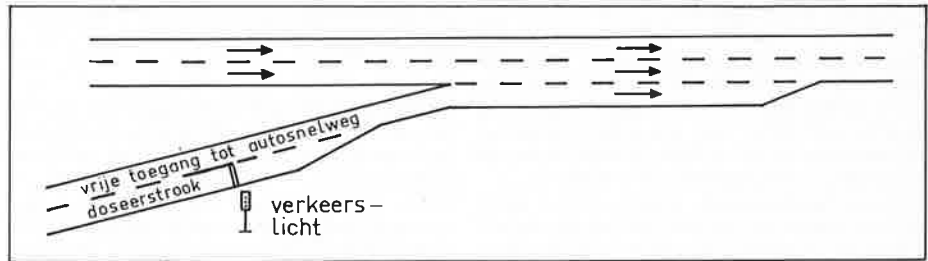
Het spreekt voor zich, dat dit berekeningsproces erg ingewikkeld kan worden indien meer knelpunten aanwezig zijn (files, die in elkaar overgaan en vervolgens weer uit elkaar gaan). Voor de wijze, waarop een en ander wordt berekend, zij verwezen naar Stock et al. (6).

De berekening van de verkeersafloop op de hoofdrijbaan (submodel d) vormt het belangrijkste onderdeel van het simulatiemodel. De uitkomsten van dit submodel vormen de belangrijkste indicatoren voor de totale verkeersafloop (reistijd, wachttijd). Daarnaast hebben de meeste speelvariabelen (regeling en ontwerp) met name betrekking op de verkeersafloop op de hoofdrijbaan.

NB. Onder file wordt verstaan die toestand van de verkeersstroom, waarbij de verkeersafloop gestoord is (onderste deel u — q/c curve, paragraaf 5.3) Een file bestaat uit stilstaande en zich achter elkaar bewegende voertuigen („stop and go“).

4. Het optimalisatiemodel

Een soort maatregel (regelstrategie), die toegepast kan worden indien men filevorming op de hoofdrijbaan van een autosnelweg tegen wil gaan, is het doseren van voertuigen bij de toeritten. Er is sprake van een strategie, omdat de mogelijkheid is ingebouwd, dat aan bepaalde voertuigen, zoals bussen en auto's met n inzittenden (bijvoorbeeld $n \geq 2$) wel een onbelemmerde toegang tot de autosnelweg



wordt verleend. Auto's met een aantal inzittenden kleiner dan n zullen met een bepaalde doseerintensiteit, die varieert van 150-900 voertuigen per uur per rijstrook op de autosnelweg worden toegelaten.

De gevolgen van deze regelstrategie kunnen drieledig zijn:

— Bevordering van „car-pooling“; verhoging van de bezettingsgraad van de auto teneinde tijdens de spitsuren een onbelemmerde toegang te hebben tot de autosnelweg.

— Bevordering van het gebruik van het openbaar vervoer. Uitgegaan wordt van de onderstelling, dat bij een groot oponthoud aan het begin van de rit de automobilist eerder geneigd zal zijn over te stappen op een andere vervoerwijze dan bij een oponthoud tijdens of aan het einde van de rit.

— Gebruik van andere „parallele“ routes, die minder zwaar belast zijn. Met betrekking tot het Nederlandse wegnnet kan dit aanleiding geven tot het gebruik van „onveilige“ sluiproutes, welk effect niet als positief kan worden aangemerkt.

In het optimalisatiemodel wordt de optimale doseerintensiteit voor elk opgegeven invoegpunt berekend. Dit geschiedt afhankelijk van de doelstellingsfunctie (zie paragraaf 2.2) en de omslagwaarde n (inzittenden per auto). Maximalisatie van de doelstellingsfunctie geschiedt met behulp van lineair programmeren. Het spreekt voor zich, dat indien men de hierboven omschreven regelstrategie wil toepassen, de verkeersinfrastructuur aan bepaalde eisen zal dienen te voldoen (zie figuur 3). Daarnaast is het erg belangrijk, dat toezicht wordt gehouden op naleving van de voorschriften.

5. Het traject Zoetermeer-Den Haag (A 12)

5.1 Inleiding

Het traject Zoetermeer-Den Haag vormt een onderdeel van de autosnelweg A12 (Den Haag-Utrecht). Ter hoogte van het verkeersplein Leidschendam wordt de autosnelweg gekruist door de autosnelweg A4 (Rotterdam-Amsterdam). In Voorburg gaat de autosnelweg A12 over in de Utrechtse baan.

Het ten behoeve van het onderzoek gekozen traject strekt zich uit vanaf de eerste invoegstrook ter hoogte van Zoetermeer tot aan het begin van de Utrechtse baan (vlak na de verkeerslichten) en is 9,7 km lang (zie figuur 4). De rijbaan bestaat uit twee rijstroken, uitgezonderd twee secties (een ter hoogte van Zoetermeer en een ter hoogte van verkeersplein Leidschendam), die ten behoeve van het

wevende verkeer met drie rijstroken zijn uitgevoerd. De Utrechtse baan is eveneens met drie rijstroken uitgerust. Het traject heeft vijf inritten en vier uitritten, die met uitzondering van de uitrit verkeersplein Leidschendam (twee rijstroken) uit een rijstrook bestaan. Het traject is onderverdeeld in 19 secties.

Als belangrijke knelpunten van het traject kunnen de volgende secties worden aangemerkt:

sectie 18 (verkeerslichten aan begin Utrechtse baan)

sectie 14 (smalle brug over de Vliet)

Bovendien blijkt, dat er files ontstaan ter hoogte van de invoegstroken O_3 (sectie 4) en O_4 (sectie 6). In paragraaf 6.2 zal hier nader op worden ingegaan.

5.2 Metingen

De metingen, die zijn uitgevoerd ten behoeve van het onderzoek, kunnen onderverdeeld worden in twee categorieën:

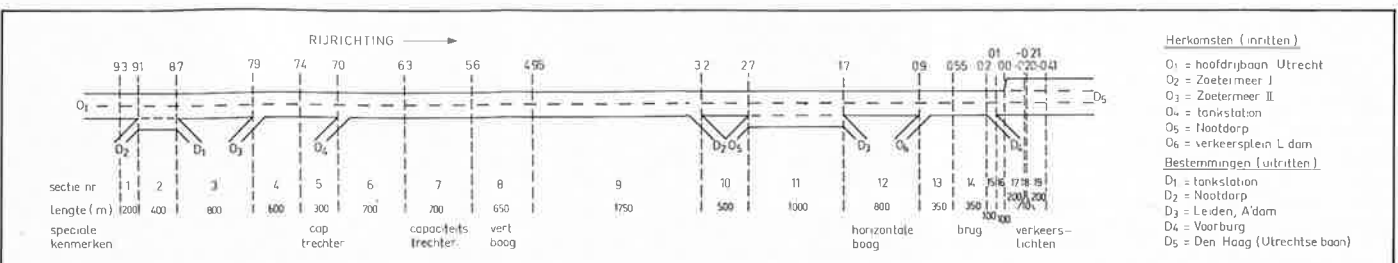
— tellingen

— snelheidsmetingen

Het verrichten van tellingen was noodzakelijk teneinde het vraagpatroon in de vorm van een herkomst-bestemmings-matrix, per tijdsinterval, voor het traject vast te kunnen stellen. Aangezien beschikt kon worden over de resultaten van enige tellingen, die onlangs door de Rijkswaterstaat op hetzelfde traject zijn verricht, is besloten af te zien van een kentekenonderzoek. Op alle in- en uitritten en op de hoofdrijbaan zijn van 6 tot 10 uur 's morgens, verdeeld in periodes van 5 minuten, alle voertuigen (vrachtauto's apart) geteld. Bovendien zijn op dezelfde wijze de aantallen voertuigen op een tweetal punten van de hoofdrijbaan, gelegen direct na een knelpunt, geteld. Deze tellingen dienden ter bepaling van de capaciteiten van de knelpunten. Voor wat betreft de gegevens over de bezettingsgraad van de voertuigen en het distributiepatroon, werd gebruik gemaakt van de resultaten van de hierboven vermelde tellingen van de Rijkswaterstaat. Gedurende dezelfde periode (6 tot 10 uur) werd een aantal snelheidsmetingen op het traject uitgevoerd.

De metingen bestonden hieruit, dat elke tien minuten een auto het traject aflegde, waarbij op een dertigtal vaste punten (gelijkmatig verdeeld over het traject) de snelheid van het voertuig en de tijd werden genoteerd. Op deze wijze kon een duidelijk beeld van de verkeersafloop op het traject (inclusief files) worden verkregen.

4. Schema traject Zoetermeer-Den Haag.



5.3 Overige gegevens

Eveneens met medewerking van de Rijks-waterstaat kon beschikt worden over een groot aantal gegevens met betrekking tot de fysieke kenmerken van het traject, zoals de plaats van de in- en uitritten, de breedte van de rijstroken, hellingsgraden en boogstralen.

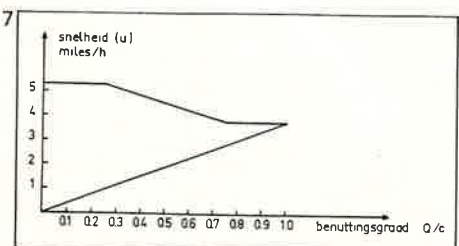
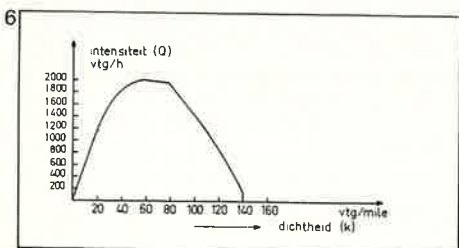
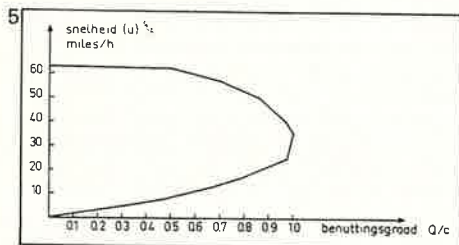
Een belangrijk gegeven, waarover men dient te beschikken, is het verband tussen de gemiddelde snelheid (u) en benuttingsgraad (q/c) per sectie. Op het traject Zoetermeer — Den Haag zijn geen metingen verricht op grond waarvan een dergelijk verband zou kunnen worden berekend.

Ook met betrekking tot andere Nederlandse autosnelwegen zijn geen gegevens bekend c.q. gepubliceerd. Met name in de VS (16), maar ook in Duitsland (17) is wel een aantal onderzoeken uitgevoerd, resulterende in een dergelijk verband tussen snelheid en benuttingsgraad, alsook het daaruit afgeleide verband tussen de intensiteit (q) en de dichtheid (k) van de verkeersstroom (ook wel het basisdiagram genoemd). Het bij het onderhavige onderzoek veronderstelde verband tussen snelheid en benuttingsgraad is weergegeven in figuur 5. Het basisdiagram is weergegeven in figuur 6. Beide diagrammen berusten voornamelijk op in het buitenland geconstateerde verbanden aangevuld met de resultaten van de op het traject Zoetermeer — Den Haag verrichte snelheidsmetingen. De regeling van de verkeerslichten kan niet in het model worden gesimuleerd. Bij de verkeerslichten aan het begin van de Utrechtse Baan (sectie 18) zijn uitgebreide tellingen en metingen van de snelheid van de verkeersstroom verricht, op grond waarvan de capaciteit van de verkeerslichten kon worden bepaald. De metingen zijn tevens gebruikt voor het vastleggen van een (hypothetisch) verband tussen de snelheid en de benuttingsgraad van deze sectie, zie figuur 7.

5. Verband tussen snelheid en benuttingsgraad (autosnelweg).

6. Verband tussen intensiteit en dichtheid (autosnelweg).

7. Verband tussen snelheid en benuttingsgraad (verkeerslicht).



6. Kalibratie

6.1 Inleiding

Onder kalibratie wordt verstaan het vergelijken en, door middel van het aanpassen van parameters van het model, het op elkaar afstemmen van de uitkomsten van het model en de meetresultaten. Ook kleine wijzigingen in het model kunnen noodzakelijk zijn doordat een bepaalde eigenschap van de verkeersstroom in het model niet juist wordt beschreven.

Met name de kwaliteit en de kwantiteit van de meetresultaten bepalen de nauwgezetheid, waarmee deze fase van het onderzoek kan worden doorlopen.

In het onderhavige onderzoek is de kalibratie van het model uitgevoerd met gebruikmaking van de volgende gegevens:

- a) Knelpunten
 - het aantal knelpunten
 - het tijdstip, waarop de file ontstaat en oplost
 - omvang van de file, begin- en eindpunt.
- b) Reistijd
 - reistijd van begin- tot eindpunt en op een aantal tussenliggende relaties.

6.2 Capaciteitstrechter

Bij het kalibreren van het model bleek, dat een tweetal files, die volgens de metingen ontstonden in de secties 4 en 6 (zie figuur 4), niet door het model voorspeld werden. Aangezien op de punten, waar de files ontstaan geen wijzigingen optreden met betrekking tot de fysieke kenmerken van de weg, diende een andere oorzaak aan dit verschijnsel ten grondslag te liggen.

Beide secties zijn gelegen vlak na een inrit. Het proces, dat zich hierbij afspeelt in de verkeersafloop op de hoofdrijbaan, kan als volgt worden beschreven. Als gevolg van de hoge

benuttingsgraad van de hoofdrijbaan worden de invoegende automobilisten gedwongen geneeuen te nemen met een inpassing in de verkeersstroom, waarbij de afstand tussen de voorligger en het invoegende voertuig veelal erg klein zal zijn. Ter hoogte van het invoegpunt neemt de automobilist genoegen met deze naar zijn oordeel te korte afstand tot zijn voorligger. De dichtheid van de verkeersstroom zal als gevolg hiervan vlak na het invoegpunt erg hoog zijn met name gezien in relatie tot de snelheid van de voertuigen. Deze combinatie van hoge dichtheden bij hoge snelheden heeft een verhoging van de capaciteit van de hoofdrijbaan ter hoogte van het invoegpunt tot gevolg. Voor de automobilist betekent dit een verzwaring van zijn mentale belasting. Heeft hij goed en wel ingevoegd, dan zal hij de neiging hebben de afstand tot zijn voorligger te vergroten, hetgeen als gevolg van het cumulatieve stochastische karakter van het verschijnsel (kettingreactie) aanleiding kan geven tot turbulenties in de verkeersstroom en een afname van de capaciteit.

Het hierboven omschreven verschijnsel wordt aangeduid met de term „capaciteitstrechter” (18). Er is verondersteld, dat de files in de secties 4 en 6 hierdoor veroorzaakt worden. Het spreekt voor zich, dat de capaciteitstrechter met name op zal treden op de rechter rijstrook. Hoe groter het aantal rijstroken per richting, des te kleiner zal het effect van dit verschijnsel zijn op de totale verkeersafloop op de hoofdrijbaan (wellicht de reden waarom de capaciteitstrechter niet in het oorspronkelijke simulatiemodel is opgenomen).

Door de capaciteit van het invoegpunt te verhogen (2200 i.p.v. 2000 vtg/h) en de capaciteit van de sectie gelegen ± 500 m na het invoegpunt te verlagen, kon de capaciteitstrechter op vrij eenvoudige wijze in het simulatiemodel worden ingebouwd.

7. Resultaten

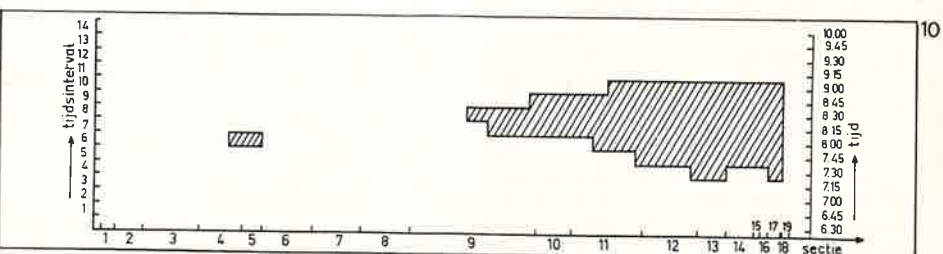
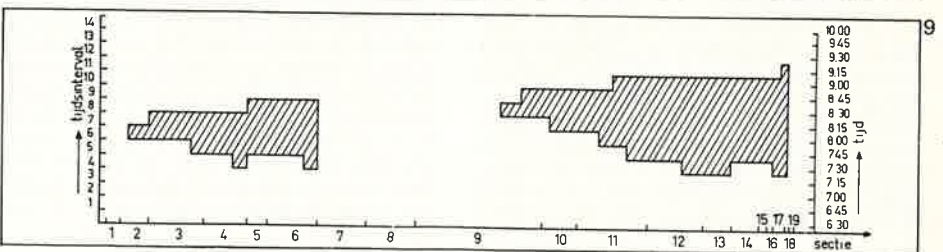
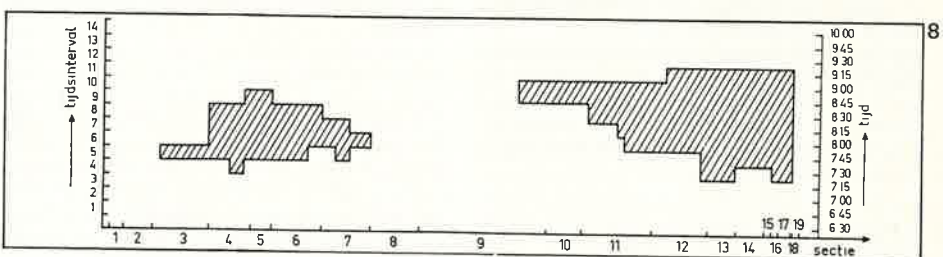
7.1 Kalibratie

In de figuren 8, 9 en 10 is de omvang van de file op het beschouwde traject weergegeven. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen

8. Omvang van de file volgens metingen in het veld.

9. Omvang van de file volgens simulatie (met capaciteitstrechter).

10. Omvang van de file volgens simulatie (zonder capaciteitstrechter).



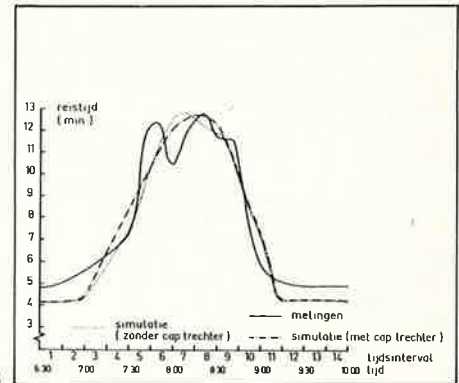
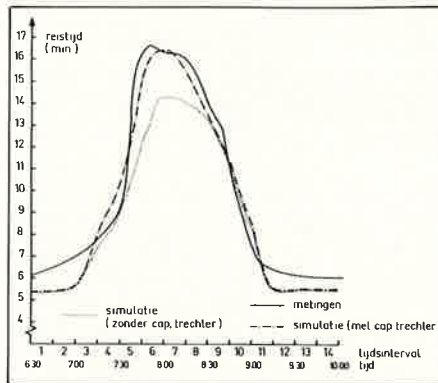
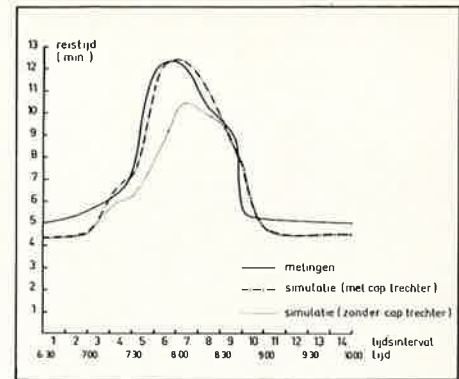
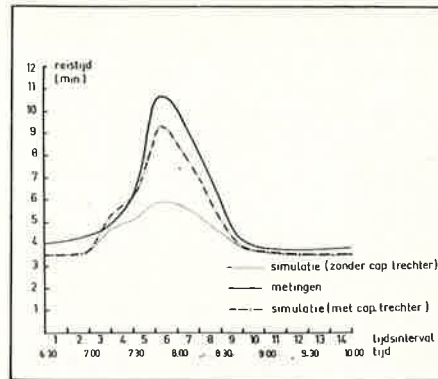
11. Verloop reistijd op de relatie O_2D_2 .
12. Verloop reistijd op de relatie O_2D_3 .
13. Verloop reistijd op de relatie O_2D_4 .
14. Verloop reistijd op de relatie O_4D_4 .

de metingen en de berekeningen met behulp van het simulatieprogramma. De berekeningen zijn uitgevoerd zowel met als zonder capaciteitstrechter.

Opvallend is de grote mate van overeenkomst tussen de gemeten file en de met behulp van het simulatiemodel met capaciteitstrechter berekende file zowel ter hoogte van Zoetermeer als ter hoogte van de Utrechtse Baan. Deze overeenkomst geldt zowel voor het tijdstip, waarop de file ontstaat en oplost, alsook voor de lengte van de file in de loop van de tijd. De periode gedurende welke een file optreedt wordt voornamelijk bepaald door de grootte van het vraagpatroon en de capaciteit van het knelpunt.

De lengte van de file wordt naast beide bovengenoemde factoren tevens in belangrijke mate bepaald door de dichtheid van de verkeersstroom. Deze is afhankelijk van de snelheid van de verkeersstroom en de intensiteit ($k = q/u$). In de figuren 5 en 6 is dit verband grafisch weergegeven zowel bij een congestievrije ongestoorde verkeersafloop (bovenste deel figuur 5, linker deel figuur 6) als bij een gestoorde verkeersafloop (onderste deel figuur 5, rechter deel figuur 6). Met name het verloop van het onderste deel van figuur 5 heeft veel effect op de lengte van de berekende file. Dit kan als volgt worden verklaard:

Afhankelijk van de snelheid van de verkeersstroom, behorende bij één bepaalde benuttingsgraad, kan de dichtheid van de verkeersstroom worden berekend. Een lage snelheid gaat gepaard met een hoge dichtheid met als gevolg een naar verhouding korte file. Evenzo geldt de omgekeerde relatie hoge snelheid →



lage dichtheid → lange file.

In de figuren 11 t/m 14 is de gemeten en berekende reistijd op een aantal relaties tijdens de ochtendspits uitgezet. Ook hier zien we weer een grote mate van overeenkomst tussen de gemeten reistijd en de met het simulatiemodel, inclusief de capaciteitstrechter berekende reistijd. De resultaten van het simulatiemodel zonder capaciteitstrechter zijn be-

duidend minder in overeenstemming met de werkelijkheid.

Uit de figuren kan ook afgelezen worden, dat er een systematisch verschil aanwezig is tussen berekende en gemeten reistijd gedurende de tijdsintervallen dat geen congestie optreedt. Dit verschil in de reistijd kan voor het merendeel verklaard worden uit het feit, dat het tijdens de metingen regende waardoor minder snel gereden werd.

Samenvattend kan geconcludeerd worden, dat er een grote mate van overeenkomst is tussen de metingen enerzijds en de berekeningen met behulp van het simulatiemodel inclusief capaciteitstrechter anderzijds. Deze overeenkomst geldt zowel voor de vorm en omvang van de files, die op het traject ontstaan alsook voor de reistijden tussen diverse relaties op het traject.

Indien geen capaciteitstrechter wordt toegepast, blijkt de overeenkomst tussen metingen en berekeningen beduidend minder te zijn. Op grond van bovenvermelde resultaten is besloten het model met capaciteitstrechter te gebruiken voor het uitvoeren van een aantal variantberekeningen, waarbij de verkeersafloop zowel gesimuleerd als geoptimaliseerd zal worden.

7.2 Simulatie en optimalisatie van de varianten

Reeds in de inleiding is benadrukt, dat het bestrijden van filevorming op autosnelwegen niet alleen kan geschieden door gebruik te maken van capaciteitsverhogende maatregelen, maar dat wellicht eenzelfde effect bereikt kan worden door het vraagpatroon te modificeren, daarbij in gedachten houdende dat een vergroting van de capaciteit veelal tot gevolg heeft, dat het vraagpatroon zich aanpast, zodat deze oplossing slechts voor een beperkte tijd soelaas biedt.

Uit de veelheid van maatregelen, zowel met betrekking tot de capaciteit als tot het vraagpatroon, is een keuze gedaan wat resulteerde in 28 varianten. De resultaten van de berekeningen, die voor al deze varianten zijn uitgevoerd (zowel simulatie als optimalisatie), zijn gedeeltelijk weergegeven in de tabellen 1, 2 en 3.



Tabel 1. Resultaten (gem. bezettingsgraad = 1,35)

		variant 1			variant 2			variant 3		
		geen ver- schuiv- vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.	geen ver- schuiv- vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.	geen ver- schuiv- vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.
reistijd op autosnelweg (reizigers uren)	sim.	2.232	2.232	2.232	1.932	1.932	1.932	1.511	1.511	1.511
	opt.	1.318	1.217	1.229	1.322	1.250	1.257	1.307	1.277	1.288
oponhoud op inrit (reizigers uren)	sim.	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	opt.	848	86	161	533	60	96	191	44	83
totale reistijd (reizigers uren)	sim.	2.257	2.257	2.257	1.957	1.957	1.957	1.536	1.536	1.536
	opt.	2.166	1.303	1.390	1.855	1.310	1.353	1.498	1.321	1.371
gemiddelde snelheid km/h	sim.	67,6	67,6	67,6	73,6	73,6	73,6	84,6	84,6	84,6
	opt.	88,5	90,9	90,6	89,0	90,8	90,6	90,6	91,4	91,1
omvang vraagpatroon	voer- tuigen	13.167	12.562	12.622	13.167	12.767	12.810	13.167	12.997	13.045
	reizi- gers	17.775	17.170	17.230	17.775	17.375	17.419	17.775	17.605	17.654
gedoseerd	voer- tuigen	5.091	3.268	3.074	6.003	2.268	3.162	4.371	2.571	3.471
file op inrit	voer- tuigen	3.391	343	644	2.130	241	385	766	177	331
verschuiving vraagpatroon	voer- tuigen	0	604	545	0	400	356	0	169	121
modal spatial shift	reizi- gers	0	604	545	0	400	356	0	169	121

Tabel 2. Resultaten (gem. bezettingsgraad = 1,50)

		variant 1			variant 2			variant 3		
		geen ver- schuiv- vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.	geen ver- schuiv- vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.	geen ver- schuiv- vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.
reistijd op autosnelweg (reizigers uren)	sim.	1.777	1.777	1.777	1.527	1.527	1.527	1.309	1.309	1.309
	opt.	1.287	1.213	1.220	1.281	1.248	1.258	1.262	1.263	1.263
oponhoud op inrit (reizigers uren)	sim.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	opt.	447	67	91	207	42	69	27	27	27
totale reistijd (reizigers uren)	sim.	1.777	1.777	1.777	1.527	1.527	1.527	1.309	1.309	1.309
	opt.	1.734	1.280	1.311	1.488	1.290	1.327	1.289	1.290	1.290
gemiddelde snelheid km/h	sim.	76,0	76,0	76,0	83,2	83,2	83,2	90,9	90,9	90,9
	opt.	89,8	91,6	91,4	90,6	91,4	91,3	92,5	92,5	92,5
omvang vraagpatroon	voer- tuigen	12.678	12.278	12.315	12.678	12.505	12.545	12.678	12.678	12.678
	reizi- gers	17.774	17.374	17.411	17.774	17.601	17.641	17.774	17.774	17.774
gedoseerd	voer- tuigen	4.345	2.723	2.721	3.890	2.038	2.931	1.324	1.324	1.324
file op inrit	voer- tuigen	1.789	266	363	829	167	275	107	107	107
verschuiving vraagpatroon	voer- tuigen	0	400	363	0	173	133	0	0	0
modal spatial shift	reizi- gers	0	400	363	0	173	133	0	0	0

Alvorens de resultaten te bespreken zal een korte toelichting gegeven worden op de onderscheiden varianten.

Ten aanzien van de eerste soort maatregel (aanpassing capaciteit) worden een drietal varianten onderscheiden:

variant 1: komt overeen met de bestaande situatie

variant 2: de verkeerslichten (sectie 18) zijn vervangen door een ongelijkvloerse kruising

(3 rijstroken, capaciteit = 6000 vtg/h)
variant 3: vanaf inrit bij het verkeersplein Leidschendam bestaat het traject uit 3 rijstroken (sectie 13 t/m 19, cap. = 6000 vtg/h). NB. variant 3 omvat variant 2.

De tweede soort maatregel bestaat hieruit, dat op een drietal inritten O_2 , O_3 en O_4 alle voertuigen, waarvan het aantal inzettenden kleiner is dan n ($n = 2$), tijdens de spitsperiode gedo-

seerd zullen worden. Het effect van deze maatregel kan tweeledig zijn, nl.:

— verhoging van de bezettingsgraad van de voertuigen.

— verschuiving van het vraagpatroon (modal en spatial shift).

Met betrekking tot de bezettingsgraad worden drie alternatieve ontwikkelingen onderscheiden nl.: de bezettingsgraad blijft constant (1,35) en de bezettingsgraad van de voertuigen op de inritten O_2 , O_3 en O_4 neemt de waarde 1,50 respectievelijk 1,65 aan.

Ook met betrekking tot de verschuiving van het vraagpatroon worden drie alternatieven onderscheiden nl.: er treedt geen verschuiving op en alle automobilisten, die langer dan 8 respectievelijk 15 minuten op een inrit in de file moeten staan kiezen een andere route of vervoerwijze.

In de tabellen zijn de volgende resultaten van de berekeningen opgenomen:

1) Reistijd op de autosnelweg in reizigers-uren (simulatie en optimalisatie);

2) Oponthoud op de inrit in reizigersuren (simulatie en optimalisatie);

3) Totale reistijd (1 + 2) in reizigersuren (simulatie en optimalisatie);

4) Gemiddelde snelheid op de autosnelweg in km/h (simulatie en optimalisatie);

5) Omvang van het vraagpatroon (voertuigen en reizigers die gebruik maken van de autosnelweg);

6) Het aantal op de inritten gedoseerde voertuigen;

7) Het aantal voertuigen, dat langer dan één tijdsinterval op een inrit in de file heeft moeten staan;

8) De verschuiving van het vraagpatroon (voertuigen en reizigers).

Bij de optimalisatie is gekozen voor de doelstellingsfunctie „maximalisatie van het aantal op de autosnelweg toe te laten personen”.

Het valt buiten het bestek van deze bijdrage om alle resultaten uitgebreid te bespreken. Alleen de meest in het oog springende resultaten zullen worden vermeld.

Het opheffen van de knelpunten heeft als gevolg een vermindering van de totale reistijd met 13% (variant 2) respectievelijk 32% (variant 3). Indien het gehele beschouwde traject uitgevoerd zou worden als een autosnelweg met drie rijstroken per richting, zou de totale reistijd afnemen tot 1169 reizigersuren, een vermindering met 48%.

Het doseren van de voertuigen op de inritten is weinig zinvol indien dit niet een verhoging van de bezettingsgraad of een verschuiving van het vraagpatroon tot gevolg heeft. Men zou hier kunnen spreken van verplaatsing van congestie, nl. van de hoofdrijbaan naar de toeritten. Dit betekent o.a. dat de plaats van de congestie voor de weggebruiker voorspelbaar is (veiligheidsaspect). In de Verenigde Staten is wel geconstateerd, dat doseren op de inritten de veiligheid verhoogt (19).

Alleen verhoging van de bezettingsgraad laat een winst zien van 20% (bezettingsgraad = 1,50) respectievelijk 33% (bezettingsgraad = 1,65). Een verschuiving van het vraagpatroon (maximum file = 8 min, bezettingsgraad = 1,35) doet de reistijd met 42% afnemen (2257 versus 1303). Men dient wel te bedenken, dat de reistijd van 604 reizigers niet in de berekening is opgenomen.

Indien de bezettingsgraad toeneemt, vermindert de verschuiving van het vraagpatroon.

Beide effecten gecombineerd geven een verlaging van de reistijd met 43% (2232 versus 1263) en een verschuiving van het vraagpatroon met 209 voertuigen (reizigers).

Nog opgemerkt dient te worden dat de waarde van de gemiddelde snelheid alleen betrekking heeft op de op de autosnelweg toegelaten voertuigen. Het oponthoud van de voertuigen op de inritten is niet in deze waarde verdisconteerd.

8. Enkele evaluerende opmerkingen

Ofschoon aan het gebruik van het programmapakket **FREQ 4CP** een aantal beperkingen zijn verbonden (zie o.a. paragraaf 2.3 en paragraaf 3) en mede als gevolg daarvan de structuur van het model voor verbetering vatbaar is, kan toch geconcludeerd worden, dat de uitkomsten van het simulatiemodel een grote mate van overeenkomst vertonen met de gemeten verkeersafloop op het traject. Het in het model inbouwen van de capaciteitstrechter heeft hier in belangrijke mate aan bijgedragen. Met betrekking tot de gevoeligheid van het model blijkt, dat bij een gegeven vraagpatroon met name de capaciteit van de knelpunten en het verband tussen de snelheid en de benuttingsgraad de vorm en omvang van de file en daarmee samenhangend de reistijd bepalen.

Het maximale oponthoud, dat een automobilist als gevolg van de files op het traject kan oplopen, bedraagt ongeveer 11 minuten. Zal de automobilist als hij **aan het begin van de rit** met een dergelijk oponthoud wordt geconfronteerd als gevolg van het doseren, kiezen voor een andere route, een andere vervoerwijze, of zal hij met één of meer automobilisten proberen een „pool” te vormen? De gevolgen van een en ander zijn middels variant-berekeningen onderzocht. Ook de gevolgen van het verhogen van de capaciteit van de weg, met name ter hoogte van knelpunten, zijn onderzocht.

Hierbij dient uitdrukkelijk vermeld te worden, dat alleen de verkeersafloop op de autosnelweg, inclusief in- en uitritten, in beschouwing is genomen. Consequenties van bepaalde maatregelen op de verkeersafloop buiten het beschouwde traject zijn niet in de berekeningen opgenomen. Zo zal een vergroting van de capaciteit van de knelpunten op het traject zeer zeker gevolgen hebben voor de verkeersafloop in de binnenstad van Den Haag (einde Utrechtse Baan).

Vragen zoals: „Is het toelaatbaar een file op de inritten van autosnelwegen te creëren?” en „Hoe is het gesteld met de naleving van de verkeersregels bij het doseren?” zijn niet gesteld, laat staan beantwoord.



Bovenstaande opmerkingen geven aan, dat het de voorkeur verdient het **FREQ 4CP** programmapakket niet afzonderlijk, maar als onderdeel van een studie in een groter verband te gebruiken. Hieronder kan worden verstaan een agglomeratie, waarbij de autosnelwegen fungeren als verkeersdragers tussen bijvoorbeeld de werk- en woongebieden. Een tweede mogelijkheid bestaat hieruit, dat niet een bepaald traject, maar dat een compleet samenhangend stelsel van autosnelwegen in beschouwing wordt genomen, bijvoorbeeld de ruit om Rotterdam. Als tweede fase

van het onderhavige onderzoek zal met name toepassing van de laatstgenoemde mogelijkheid nader worden onderzocht.

Literatuur

1. Verkeerskunde, 1979, nr. 1, blz. 21 t/m 24.
2. Transportation Research Board, „Transportation System Management”, Washington, 1977, Special Report 172.
3. „Transportation System Management: State of the art”, Final Report, UMTA RI-06-0008, sept. 1976.
4. May, A. D. en Westland, D., „Transportation System Management: TSM-type projects in six selected European countries”, Traffic Engineering and Control, Supplement, feb. 1979.
5. „Integrated Urban Traffic Management”, OECD Road Research Programme, Draft Final Report (Restricted), april 1977.
6. Stock, W. A., Blankenhorn, R. C., May, A. D., „Freeway Operations Study Phase III, the Freq 3 Model”, ITE, University of California, Berkeley, juni 1973.
7. Ovaici, K. en May, A. D., „Freeway Priority Entry Control to Favor Multi-Passenger Vehicles”, Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the sixth international symposium on transportation & traffic theory, Sydney, Australia, aug. 1977.
8. Kruger, A. J. en May, A. D., „The Analysis and Evaluation of Selected Impacts of Traffic Management Strategies on Freeways”, UCB-ITS-SR-76-4.
9. Payne, H. J., „Models of Freeway Traffic and Control”, Simulation Council proc. Mathematical Models of Public System 1 nr. 1, 1971.
10. Cremer, M., „Ein reglungstechnisches Konzept zur Verbesserung des Verkehrsablaufs auf Schnellstrassen”, Strassenverkehrstechnik, 1978, nr. 5, blz. 147 t/m 153.
11. Technische Hogeschool Delft, 5-7 okt. 1977, Workshop **FREQ 4CP**. (Freeway queueing model fourth version with vehicle priority entry control).
12. May, A. D., Feldman, M., Cooper, R., „Development of priority strategies on freeways (**FREQ 4CP**)”, Student Workbook, Institute of Transportation Studies (ITS), University of California, Berkeley, 1977.
13. **FREQ 4**: Freeway Queueing Model 4th version.
14. **PREFO**: Priority Entry at Freeway Onramps.
15. Highway Research Board, „Highway Capacity Manual 1965”, Washington, H. R. B., 1965, Special Report 87.
16. Ceder, A., May, A. D., „Further evaluation of single- and two-regime traffic flow models”, Transportation Research Record 567, Transportation Research Board, Washington, 1976.
17. 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.
18. Buckley, D. J., Yagar, S., „Capacity funnels near on-ramps”, Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the sixth international symposium on transportation and traffic theory, Sydney, Australia, aug. 1974.
19. Everall, P. F., „Urban freeways surveillance and control. The state of the art”, Federal Highway Administration, Washington, 1972.

Tabel 3. Resultaten (gem. bezettingsgraad = 1,65)

		variant 1			variant 2			variant 3		
		geen ver- schuiv. vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.	geen ver- schuiv. vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.	geen ver- schuiv. vraag	maximale file = 8 min.	maximale file = 15 min.
reistijd op autosnelweg (reizigers uren)	sim.	1.453	1.453	1.453	1.321	1.321	1.321	1.220	1.220	1.220
	opt.	1.253	1.217	1.221	1.246	1.237	1.242	1.220	1.220	1.220
oponthoud op inrit (reizigers uren)	sim.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	opt.	204	46	63	65	19	40	0	0	0
totale reistijd (reizigers uren)	sim.	1.453	1.453	1.453	1.321	1.321	1.321	1.220	1.220	1.220
	opt.	1.457	1.263	1.284	1.311	1.256	1.282	1.220	1.220	1.220
gemiddelde snelheid km/h	sim.	84,3	84,3	84,3	89,3	89,3	89,3	94,2	94,2	94,2
	opt.	90,9	92,1	91,9	92,1	92,2	92,1	94,2	94,2	94,2
omvang vraagpatroon	voer- tuigen	12.285	12.076	12.102	12.285	12.224	12.253	12.285	12.285	12.285
	reizi- gers	17.784	17.575	17.601	17.784	17.723	17.751	17.784	17.784	17.784
gedoseerd file op inrit	voer- tuigen	2.693	1.879	1.866	1.259	641	1.268	0	0	0
	voer- tuigen	817	183	254	260	76	159	0	0	0
verschuiving vraagpatroon modal shift spatial	voer- tuigen	0	209	183	0	61	33	0	0	0
	reizi- gers	0	209	183	0	61	33	0	0	0