

Technical report bds:01-03

# **Kiezen voor Golven, Stromen of Beweging\***

A. Hegyi, B. De Schutter, J. Hellendoorn, S. P. Hoogendoorn, and  
C. Tampère

*To cite this work, please refer to the published version:*

A. Hegyi, B. De Schutter, J. Hellendoorn, S.P. Hoogendoorn, and C. Tampère,  
“Kiezen voor golven, stromen of beweging,” *Verkeerskunde*, vol. 52, no. 4, pp. 32–36,  
2001. In Dutch.

# Gelijke behandeling voor verkeersstroommodellen

## Kiezen voor golven, stromen of beweging

A. Hegyi\*, B. De Schutter\*, J. Hellendoorn\*, S.P. Hoogendoorn<sup>†</sup>, C. Tampère<sup>‡</sup>

### Samenvatting

Steeds vaker worden verkeersstroommodellen toegepast voor de evaluatie van alternatieve infrastructurele investeringen, verkeersregelingen of voor korte termijn voorspellingen van het verkeer. De hoge kosten vragen immers om een goed inzicht in de gevolgen van de mogelijke alternatieven. Voordat er wordt gesimuleerd, moet er een keuze worden gemaakt met welke simulatiemodel gewerkt wordt. Voorzichtigheid is geboden, want verschillende modellen kunnen zeer uiteenlopende resultaten geven.

Verkeersstroommodellen hebben hun nut op verschillende gebieden bewezen. Ten eerste kunnen nieuwe geplande verkeerscondities of infrastructurele aanpassingen gesimuleerd worden om te beoordelen of de gewenste effecten worden bereikt. Ten tweede kunnen verkeerscentrales gebruik maken van simulaties om de verkeersregelingen niet alleen op de huidige toestand af te stemmen maar ook rekening te houden met korte termijn ontwikkelingen. Ten derde kunnen met simulaties verschillende verkeersregelstrategieën worden geëvalueerd.

## 1 Vele benaderingen

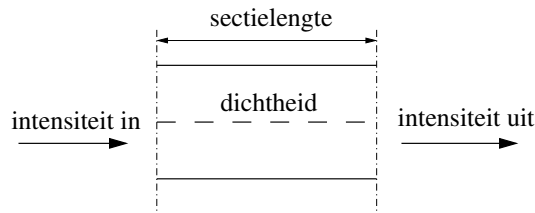
Er zijn echter tientallen simulatiemodellen ontwikkeld waaruit men een keuze kan maken. De verschillen zijn vaak voor de gebruikers moeilijk te zien, en men concludeert al gauw dat het daarom ook niet veel uitmaakt met welk model er wordt gewerkt. Maar de keuze van het model kan wel degelijk invloed hebben op de uitkomsten van een simulatie. De makers van de modellen hebben namelijk verschillende uitgangspunten gehanteerd bij het opbouwen van hun modellen, omdat ze verschillende voorkeuren hebben over welke *aspecten* van een verkeersstroom belangrijk zijn en welke niet. Zo zijn er modellen die hun oorsprong hebben in een fysisch verschijnsel dat vergeleken kan worden met het verkeer. Zulke analogieën zijn bijvoorbeeld getrokken tussen de golven in het verkeer en de golven in een rivier (Lighthill-Whitham-Richards model), het stromen van voertuigen en het stromen van gasmoleculen (gaskinetische modellen van Hoogendoorn-Bovy, of van Helbing), of tussen de beweging van voertuigen en de beweging van vloeistofmoleculen (cellulaire automaten geïntroduceerd door Nagel en Schreckenberg). Er zijn ook modelleringprincipes die hun oorsprong niet in de fysica hebben, maar bijvoorbeeld in de psychologie. Zo kunnen de beslissingen die een bestuurder neemt, beschreven worden als functie van het omringende verkeer. Dan beschrijft het geheel van alle beslissingen van alle bestuurders het verkeersproces. Het is niet verrassend dat de keuze van een modelleringprincipe bepalend is voor het gedrag van een model.

---

\*TU Delft, Faculteit Informatietechnologie en Systemen

<sup>†</sup>TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

<sup>‡</sup>TNO-INRO, Delft



Figuur 1: De wet van behoud van voertuigen houdt in dat het aantal voertuigen dat in een bepaalde tijd een wegsectie oprijdt minus het aantal dat eraf rijdt gelijk is aan de toename van het aantal voertuigen op die sectie. De toename gedeeld door de lengte van de wegsectie is de toename van de dichtheid. De wet van behoud van voertuigen legt dus een verband tussen de macroscopische grootheden *intensiteit* en *dichtheid*.

Naast een indeling op grond van modelleringprincipes is er ook indeling mogelijk naar de schaal waarop de verkeersstromen beschreven worden. *Macroscopische* modellen beschrijven het verkeer in termen van geaggregeerde grootheden zoals (gemiddelde) intensiteit, snelheid en dichtheid op een sectie zonder de individuele voertuigen te beschouwen. Manoeuvres zoals het wisselen van rijstrook worden niet expliciet beschreven. Voorbeelden van macroscopische modellen zijn het Lighthill-Whitham-Richards model, het Payne model, het cell-transmission model van Daganzo, en METANET. *Mesoscopische* modellen beschrijven de verkeersstromen ook op een geaggregeerd niveau, maar maken ook gebruik van een algemene beschrijving van individueel gedrag als functie van macroscopische grootheden. Dit gedrag wordt niet per voertuig gespecificeerd, maar in stochastische grootheden. Bijvoorbeeld, een inhaalmanoeuvre wordt *gemiddeld* geïnitieerd door bepaalde dichtheden en snelheidsverschillen tussen de aangrenzende stroken. Voorbeelden van mesoscopische modellen zijn de zogenaamde *headway distribution* modellen, die de statistiek van het volggedrag beschrijven, en de gaskinetische modellen. *Microscopische* modellen beschrijven het gedrag van individuele voertuigen als functie van het gedrag van de andere voertuigen in de nabije omgeving. Beslissingen om te vertragen, versnellen of in te halen, worden per voertuig gemaakt. Er zijn tientallen microsimulatie modellen ontwikkeld, zoals bijvoorbeeld Paramics, AIMSUN2, FLEXSYT-II, of HUTSIM. Het zal duidelijk zijn dat modellen bedoeld om het verkeer te beschrijven op het ene detailniveau niet perse geschikt zijn voor een ander detailniveau. Naast modeleringprincipe of detailniveau kun je de verkeersstroommodellen ook categoriseren volgens andere eigenschappen, zoals stochastisch of deterministisch, continu of discreet, analytisch of simulatiemodel.

## 2 Fysische wetmatigheden

Er zijn dus wezenlijke verschillen tussen de modellen, maar er zijn twee fysische wetmatigheden waaraan alle modellen voldoen: *de wet van behoud van voertuigen* en het fundamenteel verband tussen *intensiteit*, *snelheid* en *dichtheid*. Simpel gezegd houdt de wet van behoud van voertuigen in dat er geen voertuigen zomaar kunnen verdwijnen of verschijnen. Dus alle voertuigen die een wegsectie oprijden, rijden er uiteindelijk ook weer af, of ze blijven op de sectie (zie Figuur 1). De andere wetmatigheid formuleert dat de intensiteit (het aantal voertuigen dat per tijdseenheid langs komt) gelijk is aan het product van de dichtheid (aantal voertuigen per eenheid weglengte) en de snelheid (de afgelegde weg per tijdseenheid):

$$\text{intensiteit} = \text{dichtheid} \times \text{snelheid} \quad .$$

### 3 Schokgolven

In het Lighthill-Whitham-Richards (LWR) model wordt hieraan nog een derde vergelijking toegevoegd, die uitdrukt dat bij elke dichtheid een bepaalde snelheid (dus ook intensiteit) hoort. Hiermee hebben we drie vergelijkingen met drie onbekenden, en kunnen we de ontwikkeling van de intensiteit, dichtheid en snelheid beschrijven (zie Kader 1). In dit model staan de golven van dichtheidsveranderingen centraal. Door de beweging van deze golven te beschouwen kan het verloop van het verkeer beschreven worden. De golven kunnen zowel stroomafwaarts voortbewegen (een aantal voertuigen rijden wat dicht op elkaar, maar rijden gewoon door) als stroomopwaarts (terugslaan van congestie), en als twee golven elkaar ontmoeten vormen ze samen een nieuwe golf. Zo kunnen steeds meer golven samenvloeien en uiteindelijk een schokgolf vormen, zoals het uiteinde van een file waar je zeer abrupt moet afremmen. De oorsprong van dit model ligt in de beschrijving van (schok)golven in rivieren.

Het belangrijkste kritiek op het LWR model is dat het veronderstelt dat de snelheid zich meteen aanpast aan de dichtheid in plaats rekening te houden met enige reactietijd van de bestuurder. Hierdoor kunnen de schokgolven onrealistisch groot worden.

Om dit te verhelpen heeft Payne aangenomen dat een voertuig zijn snelheid met vertraging (vanwege de reactietijd) aanpast aan de snelheid die hoort bij de dichtheid van het verkeer waarin hij rijdt. Als deze aanname in termen van macroscopische grootheden wordt geformuleerd, ontstaat er een vergelijking die de gemiddelde snelheid op een korte wegsectie beschrijft als een samenspel van drie processen. Het mooie is dat deze processen ook een fysische interpretatie hebben. Ten eerste, door het instromen van snellere voertuigen op een wegsectie neemt de gemiddelde snelheid toe (convectie). Ten tweede, zullen de bestuurders hun snelheid willen aanpassen aan de snelheid die bij de huidige dichtheid past (relaxatie). En ten derde, zullen de bestuurders reageren op de verkeerscondities die stroomafwaarts heersen (anticipatie).

Ook op dit model is de nodige kritiek gegeven. Vanwege het relaxatieproces zullen de langzamere voertuigen geneigd zijn om door de snellere voertuigen „meegezogen” worden. Immers, een sneller leidend voertuig veroorzaakt een groeiend gat tussen de voertuigen, dus een lagere dichtheid, waarbij weer een grotere snelheid hoort voor het volgvoertuig. Daarnaast is de term die het anticipatiegedrag uitdrukt, niet richtingspecifiek. Dat wil zeggen dat de verkeerscondities achter het voertuig evenveel invloed hebben als voor het voertuig. Dit kan zelfs tot gevolg hebben dat voertuigen in een simulatie achteruit gaan rijden op een snelweg. Er zijn tegenwoordig nog complexere modellen ontwikkeld die deze problemen aanpakken.

Gaskinetische modellen zijn gebaseerd op vergelijkingen die het stromen van gasmoleculen beschrijven. Deze modellen beschrijven net als het Payne model het verloop van het verkeer als gevolg van drie processen. Het idee van convectie is identiek aan het model van Payne. Relaxatie en anticipatie zijn echter vervangen door twee processen die beschrijven dat de bestuurders versnellen om hun wenssnelheid te bereiken en vertragen als ze gehinderd worden door een trager voertuig. Gaskinetische modellen kunnen ook gedrag als inhaalmanoeuvres en het wisselen van strook beschrijven. Dit betekent dat microscopisch gedrag macroscopisch beschreven wordt, daarom worden deze modellen mesoscopisch genoemd. De sterkte van mesoscopische modellen is dat zij goed in staat zijn om verschillende congestiepatronen (zoals *Stop-and-Go* verkeer) goed te beschrijven.

De meeste commercieel beschikbare simulatiepakketten zijn gebaseerd op micromodellen. Sinds de jaren '60 zijn er tientallen micromodellen ontwikkeld, die meestal het volggedrag van een enkel voertuig beschrijven. Daarom worden ze *car-following* of *follow-the-leader* modellen

genoemd. Er zijn verschillende invalshoeken waaruit het volgedrag beschreven kan worden. Zo gaan de zogenaamde *safe-distance* modellen ervan uit dat het volgedrag fundamenteel wordt bepaald door de volgafstand die nog net veilig is. De simpelste variant definieert de veilige afstand als een lineaire functie van de snelheid. Gezien de eenvoud van dit model is het verbazingwekkend dat het de werkelijkheid best goed beschrijft. Ingewikkeldere *safe-distance* modellen houden bovendien rekening met reactietijd (waarnemen, beslissen, remmen), of de risico's die de bestuurders bereid zijn te nemen. *Stimulus-response* modellen drukken de responsie van de bestuurders uit als een product van een stimulus en een gevoeligheidsfactor. Zo kan bijvoorbeeld een bestuurder zijn snelheid aanpassen aan het snelheidsverschil tussen zijn eigen voertuig en zijn voorganger:

$$\text{versnelling} = \text{gevoeligheidsfactor} \times (\text{snelheid voorganger} - \text{eigen snelheid}).$$

Volgens deze vergelijking reageert het volgvoertuig even hard, bij gegeven snelheidsverschil, onafhankelijk van de afstand tot het leidvoertuig. Wanneer de afstand tussen de twee voertuigen groot is, is dit niet realistisch. Bovendien worden langzame volgvoertuigen „meegetrokken” met de snellere leiders. Daarom zijn er *psycho-spacing* modellen ontwikkeld, die het gedrag van de bestuurders beschrijven als functie van verschillende soorten verkeerscondities. Volgens inzichten in de waarnemingspsychologie reageren bestuurders pas als de stimuli boven een bepaalde drempel uitkomen. Bijvoorbeeld, als de afstand tussen de twee voertuigen groot is, wordt het gedrag van het volgvoertuig niet beïnvloed door de snelheidsverschillen. Maar als de afstand klein is, veroorzaakt een snelheidsverschil pas een reactie als dat boven een bepaalde grens komt. Wiedemann ontwikkelde het eerste *psycho-spacing* model waarbij hij ook het wisselen van strook en het inhaalgedrag beschreef. *Psycho-spacing* modellen zijn de basis van een aantal huidige microscopische simulatie modellen.

Door de beschikbaarheid van snelle computers is het gebruik van complexe microsимуlatiemodellen toegenomen. Deze modellen beschrijven het individueel gedrag van voertuigen meestal door een groot aantal als-dan regels. In de SMARTTEST studie is een groot aantal modellen vergeleken op verscheidene algemene eigenschappen zoals, beschikbaarheid van ITS (Intelligente Transport Systemen) functies (route advies, toeritdosering), of objecten en verschijnselen zoals geparkeerde voertuigen, fietsers, en weersinvloeden. De exacte werking van commercieel beschikbare microsimulation pakketten is vaak niet openbaar. Daarom is de *kalibratie* (het instellen van de modelparameters met behulp van een dataset) en vooral de *validatie* (het controleren van het model na de kalibratie, met behulp van een andere dataset) des te belangrijker. In het SMARTTEST project is er dan ook een „*Best Practice Manual*” gemaakt, waarin advies wordt gegeven over het praktische gebruik van microsimulation modellen.

## 4 Cellulaire automaten

Een recente ontwikkeling op het gebied van micromodellen is het zogenaamde *cellulaire automaten* model. In dit model wordt een weg voorgesteld als rij van kleine cellen van gelijke lengte (van bijvoorbeeld 7.5 m. Deze afstand is ongeveer gelijk aan de gemiddelde afstand tussen de voertuigen in een file. Er zullen dus nooit twee voertuigen in een cel zitten. Per tijdstap (bijvoorbeeld 1 s) verplaatst een voertuig zich een of meer cellen vooruit. De snelheid van elk voertuig wordt bepaald door drie processen:

- *Versnelling*: Zolang een voertuig zijn maximale snelheid niet heeft bereikt, zal het versnellen.
- *Interacties tussen voertuigen*: Om botsingen te vermijden mag een voertuig niet onbeperkt snel rijden, daarom wordt de snelheid nooit groter dan de afstand tot de voorganger.
- Omdat bestuurders soms te veel afremmen bij een kleine volgafstand, of gewoon niet opletten wanneer ze hun maximumsnelheid willen handhaven, is het derde proces het *willekeurig vertragen*. Dit proces wordt echter niet altijd, maar met een bepaalde kans toegepast, omdat het willekeurig vertragen ook niet altijd optreedt.

Het voordeel van het cellulaire automaten model is dat er zeer grote netwerken kunnen worden gesimuleerd. Interessant is dat dit model het ontstaan en oplossen van *Stop-and-Go* verkeer bij toeritten kan reproduceren. Uit verificatiestudies blijkt dat het model redelijk realistische resultaten geeft als het om macroscopische snelheid-dichtheid relaties gaat.

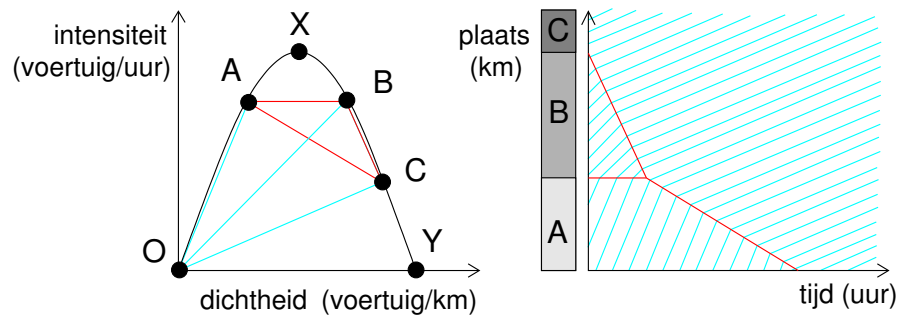
## 5 Conclusies

Het belang van verkeersstroomsimulaties is steeds groter in infrastructurele investeringen of het ontwerpen van verkeersregelingen. Om een simulatieresultaat op zijn waarde te kunnen schatten, is het belangrijk te weten waar een bepaald model wel en niet geschikt voor is. Op theoretische gronden kan al vaak uitsluitend gegeven worden over de geschiktheid van een model voor een bepaalde toepassing. De modellen worden vaak ontwikkeld vanuit een bepaalde visie, en daarmee worden ook de aspecten vastgelegd die de maker van het model belangrijk vindt. Bovendien worden er meestal nog extra aannames gedaan (zoals over de vorm van het fundamenteel diagram, zie Kader 1). Als er andere aspecten belangrijk zijn voor een toepassing, of de aannames niet gelden, is het model niet geschikt. Daarnaast is de kalibratie en validatie zeer belangrijk. Als er weinig verkeersdata beschikbaar is, is het niet goed mogelijk om een model met veel parameters te kalibreren en te valideren. Een model met veel parameters kan altijd wel *gefit* worden op de kalibratiedata, maar bij de validatie zal vaak blijken dat het generalisatievermogen van het model niet goed is. Tenslotte is de gebruikersvriendelijkheid van een simulatiepakket ook niet onbelangrijk. Bijvoorbeeld, een grafische user-interface om verkeersnetwerken in te voeren wordt door de gebruikers erg gewaardeerd. Vanwege de verschillende criteria is het dus niet mogelijk om te zeggen welk model „het beste” is. Per toepassing zal de afweging moeten worden gemaakt welk model het meest geschikt is.

## Literatuur

1. S. Algers, E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Di Taranto, M. Dougherty, K. Fox, J.F. Gabard, *Smartest – Review of Micro-Simulation Models*, Rep. SMARTTEST/D3, Institute for Transportation Studies, University of Leeds, Leeds, UK, 1998. Zie ook <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest>.
2. S.P. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy, *State-of-the-Art of Vehicular Traffic Flow Modelling*, Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering, 2001. Aanvaard voor publicatie.

3. C.F. Daganzo, *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*, Pergamon, New York, 1997.
4. W. Leuzbach, *Introduction to the Theory of Traffic flow*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
5. Cellulaire automaten:  
<http://www.zpr.uni-koeln.de/Forschungsverbund-Verkehr-NRW/>  
<http://rcswww.urz.tu-dresden.de/helbing/RoadApplet/>
6. D. Helbing, A. Hennecke, V. Shvetsov, M. Treiber, *Micro- and Macrosimulation of Freeway Traffic*, Paper invited by Mathematical and Computer Modelling, 2000.
7. D. Helbing, M. Treiber, *Jams, Waves and Clusters*, Science, vol. 282, no. 5396, pp. 2001–2003, 1998.
8. Overzicht verkeerskundige software: <http://www.trafficlinq.com/software.htm>

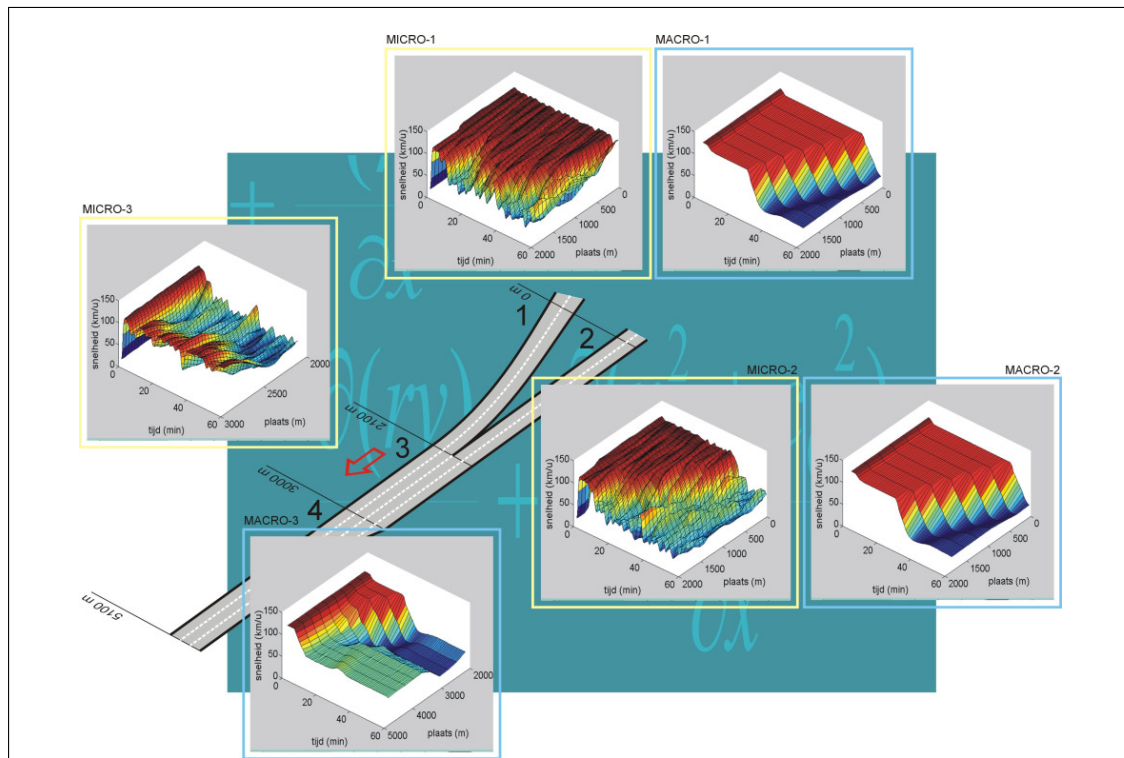


Figuur links: in het LWR model wordt verondersteld dat bij elke dichtheid een gegeven intensiteit hoort, aangegeven door de zwarte lijn. Deze curve is bekend als het *fundamentele diagram*. Karakteristiek aan dit diagram is dat het begint in de oorsprong (bij een dichtheid van nul is de intensiteit natuurlijk ook nul), daarna volgt een nagenoeg recht stuk (tot punt A) dat het vrije verkeer beschrijft. De helling van dit stuk is de snelheid van het vrij stromend verkeer. (Immers, snelheid = intensiteit / dichtheid.) Als de dichtheid verder stijgt, kan het verkeer niet meer vrij stromen en zal de intensiteit steeds minder snel meestijgen, totdat er een maximum wordt bereikt (punt X). De intensiteit bij dit punt is de capaciteit van de weg. Als de dichtheid nog verder toeneemt, raakt het verkeer verstopt en zal de intensiteit steeds sterker dalen. Bij de filedichtheid Y komt het verkeer compleet tot stilstand.

Stel dat op tijdstip 0 het verkeer verdeeld is over een wegsectie zoals in het figuur rechts: een stuk met vrij stromend verkeer met dichtheid A, een stuk dicht verkeer met dichtheid B, en stuk langzaam rijdend verkeer met dichtheid C en (A;B;C). De blauwe lijnen zijn de trajecten die individuele voertuigen afleggen als functie van de tijd. Hoe steiler de lijn hoe sneller het voertuig rijdt. Omdat de snelheid van de voertuigen bepaald wordt door de dichtheid (fundamentele diagram) zal de helling van de lijnen in de rechter figuur parallel lopen aan de overeenkomstige lijnen OA, OB en OC in het fundamentele diagram. Bijvoorbeeld, de lijnen in het gedeelte waar het verkeer vrij stroomt (gebied A, het stuk rondom de oorsprong in het rechter figuur), lopen de lijnen parallel aan de lijn OA. De voertuigen in gebieden B en A zullen zich aansluiten bij het langzaam rijdend verkeer in gebied C. Daarom verplaats de grens tussen C en B, en later tussen C en A, zich stroomopwaarts.

Het frappante van het LWR model is dat de beweging van de grensgebieden (golffront) tussen de secties met verschillende dichtheden ook uit het fundamentele diagram te halen is, en daarmee het stromen van het verkeer compleet te beschrijven is. Bijvoorbeeld, het golffront tussen A en B beweegt parallel aan de lijn die de punten A en B verbindt in het fundamentele diagram (de rode lijnen). Hetzelfde geldt voor het golffront tussen B en C, waarin het terugslaan van congestie te zien is. Omdat het golffront BC sneller naar achteren verplaatst dan AB zullen ze elkaar ontmoeten en samen een schokgolf vormen. Deze schokgolf verplaatst zich met een snelheid die op zijn beurt weer parallel is aan de lijn AC.

Kader 1: Het LWR model en het fundamentele diagram



Om de mogelijke verschillen tussen de resultaten van verkeersstroommodellen te demonstreren, is dezelfde wegsituatie met twee verschillende modellen gesimuleerd. De verkeersstromen op de inkomende secties 1 en 2 (beide tweestrooks) worden samengevoegd in een vierstrooks sectie (3), die daarna overgaat in een driestrooks sectie waarbij de linker strook wegvalt (4). De capaciteit van sectie 4 is lager dan de intensiteit van het verkeer en daarom ontstaat er file. De grafieken tonen het verloop van de snelheden over de secties 1,2 en 3. De geel omkaderde grafieken horen bij een micromodel (Paramics), de blauwe bij een macromodel (Payne). Het Payne model voorspelt dat er file ontstaat in sectie 3 die stroomopwaarts propageert naar secties A en B, waarbij het snelheidsprofiel op beide secties precies hetzelfde is. Het Paramics model voorspelt ook een vergelijkbare file op sectie 3 maar die propageert alleen naar sectie 2, en op sectie 1 blijft de snelheid hoog.

De twee modellen geven dus kwalitatief duidelijk verschillende resultaten. Dit is begrijpelijk, want in Paramics wordt er rekening gehouden met het feit dat het de linkerstrook is die wegvalt. De bestuurders op die strook moeten naar rechts invoegen wat het verkeer afremt, maar de twee rechter stroken zullen daar minder last van hebben. Het Payne model maakt geen onderscheid tussen de plekken waar een strook kan verdwijnen, het ziet alleen een capaciteitsafname. Daarom propageert de file symmetrisch naar achteren.

De vraag welk model nu beter is, is niet eenduidig te beantwoorden. Als men alleen geïnteresseerd is de totale reistijdverliezen van alle weggebruikers, heeft het Payne model de voorkeur, omdat het veel simpeler is. Als men geïnteresseerd is in details, zoals in welke richting de file terugslaat, dan geeft Paramics een realistischer resultaat.

Kader 2: Verschillen in verkeersstroommodellen