

# Dynamica van verkeersnetwerken: individuele oorzaken, collectieve gevolgen

**Victor L. Knoop**

Technische Universiteit Delft<sup>1</sup>

**Hans van Lint**

Technische Universiteit Delft<sup>2</sup>

**Kai Yuan**

Technische Universiteit Delft<sup>3</sup>

**Boudwijn Zwaal**

Technische Universiteit Delft

---

In het Nederlandse wegverkeer is veel vertraging. Een vermindering van het verkeer zorgt ook voor een vermindering van die vertraging. Dit kan bereikt worden door maatregelen als beprijzing of spitsrechten. Het verkeerssysteem is één samenhangend systeem over grote afstanden. Om de effecten van deze maatregelen op netwerkschaal te beoordelen, moeten we daarom een netwerk beschouwen waarbinnen deze grote verplaatsingen geheel plaatsvinden. De vertraging en dynamiek in dat netwerk bepalen we op zone-niveau via het macroscopisch fundamenteel diagram (MFD); dit wordt ook wel een “badkuipmodel” genoemd. In dit artikel gaan we in op het modelleren op deze schaal: welke aanpak er mogelijk is, wat effecten van maatregelen zijn en welke mogelijkheden dat biedt. We laten ten eerste zien dat dat verkeerslichten sterk bijdragen aan effectief verkeersmanagement doordat de doorstroming in de zone beïnvloed wordt. Ten tweede presenteren we een vernieuwende manier om de vorm van het MFD te bepalen: we tonen aan dat dit – onafhankelijk van het netwerk – bepaald wordt door het vraagpatroon (hoeveel voertuigen vertrekken wanneer). Dit geeft aan dat vraag-beïnvloeding op twee manier doorwerkt: het bepaalt het aantal auto’s in het netwerk, maar het bepaalt ook (via het MFD) de uitstroom van het netwerk *gegeven het aantal auto’s in het netwerk*. Daardoor kan vraag-beïnvloeding een nog effectievere maatregel zijn dan al werd verondersteld. Ten derde laten we zien dat het mogelijk is om het MFD te gebruiken voor het simuleren van verkeer in grote netwerken (bijvoorbeeld een gebied als de hele Randstad). Ruimtelijk-economische kosten-batenberekeningen zijn met zo’n model te maken, waarbij het voordeel is dat het een dynamisch model is. Het tweede punt, een MFD dat onafhankelijk is van het netwerk, is een fundamenteel nieuw inzicht dat verdere studie behoeft: als het vraagpatroon het MFD bepaalt, hoe zit het met het vraagpatroon. Het derde punt, een zone-gebaseerd model, biedt belangrijke aanknopingspunten voor ruimtelijk-economische afwegingen gerelateerd aan mobiliteit.

*Trefwoorden:* Netwerk Fundamenteel Diagram, NFD; Macroscopisch Fundamenteel Diagram (MFD); verkeersafwikkeling; grid-lock; vertrektijdspijpkeuze; verkeersregeling

---

<sup>1</sup> Technische Universiteit Delft, E: [v.l.knoop@tudelft.nl](mailto:v.l.knoop@tudelft.nl)

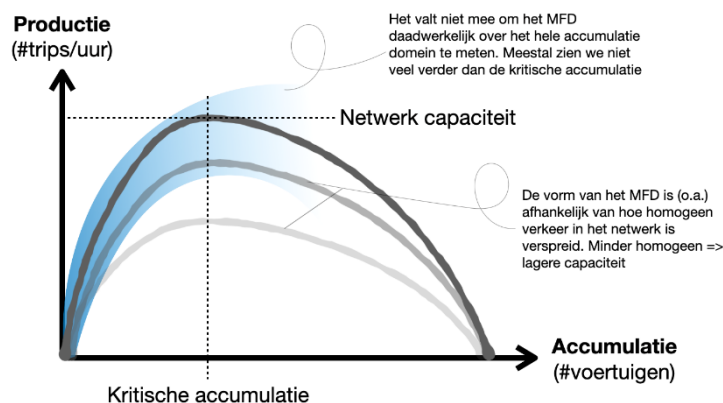
<sup>2</sup> Technische Universiteit Delft, E: [j.w.c.vanlint@tudelft.nl](mailto:j.w.c.vanlint@tudelft.nl)

<sup>3</sup> Technische Universiteit Delft, E: [k.yuan@tudelft.nl](mailto:k.yuan@tudelft.nl)

## 1. Introductie

Wegverkeer kan—net als heel veel verschijnselen om ons heen—op veel verschillende schaalniveaus worden beschreven. Op microscopisch niveau, d.w.z. op het niveau van de voertuigen, kunnen we bijvoorbeeld met gedetailleerde wiskundige modellen beschrijven hoe bestuurders elkaar volgen en inhalen, en welke hiaten ze accepteren bij het in- en uitvoegen. Dit soort (gedrags)modellen geven ingenieurs de mogelijkheid om achter hun computer verkeersregelingen of nieuwe ideeën voor weg-ontwerp door te rekenen. Op een iets grover (macroscopisch) schaalniveau blijkt wegverkeer goed te beschrijven te zijn als een soort vloeistof (door een pijpleiding). Deze modellen beschrijven gemiddeld rijgedrag en de systeem-dynamica die daaruit volgt: het groeien en weer oplossen van files en wachtrijen. Net als in vloeistofdynamica worden de individuele deeltjes (auto's) niet los beschreven. Fenomenen die zulke modellen reproduceren onde meer zogenaamde kinematische golven—denk aan de golf van remlichten die ontstaat zodra een verkeerslicht op rood springt. Met dit soort modellen is uit te rekenen waar files in netwerken ontstaan en welke consequenties (reistijd, onbetrouwbaarheid) ze hebben op het netwerk.

Het is mogelijk om nog grover naar verkeersstromen te kijken door complete verkeersnetwerken te beschrijven als een reservoir, ofwel een zone of een badkuip, waar verkeer in- en uitstroomt. In zo'n "badkuipmodel" speelt de infrastructuur en daarmee de precieze locatie(s) waar files ontstaan geen rol, zo lang het in ergens in de zone is. Het gaat om hoeveel verkeer het gehele netwerk in de zone per tijdseenheid kan afwickelen (de productie) als functie van de hoeveelheid verkeer die zich in het netwerk bevindt (de accumulatie) (Daganzo, 2007). Een gestileerde versie van deze relatie, meestal aangeduid met macroscopische fundamenteel diagram (MFD), is gegeven in Figuur 1. Het MFD is vooral in de jaren '10 van deze eeuw populair geworden onder verkeer- en vervoerwetenschappers, omdat het de mogelijkheid biedt om op netwerkniveau regelalgoritmes te bedenken. Denk daarbij een routing, instroomregulering en/of beprijzing. Ook vervoerseconomen hebben het MFD omarmd, omdat dit zogenaamde "badkuipmodel" expliciet rekening houdt met het feit dat netwerken slechter presteren als de accumulatie te hoog wordt. Klassieke wachtrij-modellering gaat uit van een constante netwerk-capaciteit, en daarmee worden de effecten van overbelasting in kosten-baten berekeningen sterk onderschat.



Figuur 1: Een schematische voorstelling van het macroscopische fundamenteel diagram (MFD).

Het enthousiasme om het MFD in te zetten als gereedschap bij verkeer- en vervoersmanagement heeft te maken met de eenvoud van de relatie tussen productie en accumulatie. Figuur 1 illustreert dat (a) een netwerk een maximale productie heeft om verkeer af te wikkelen (de zogenaamde netwerk-capaciteit) die bereikt wordt bij een kritische accumulatie (van voertuigen in dat netwerk); (b) voorbij die kritische accumulatie de productie in een netwerk weer afneemt, potentieel zelfs tot nul (een gridlock toestand waarin iedereen op iedereen "staat te wachten"); en (c) er heel veel

factoren zijn die de vorm van deze MFD relatie bepalen, waarvan de spreiding van verkeer over het netwerk een van de belangrijkste is. Hoe onevenrediger die spreiding, hoe lager de netwerkcapaciteit. Door middel van simulatie zijn voor veel verschillende netwerken en scenario's MFDs te construeren, zie Knoop et al. (2014). Empirische onderbouwing (met echte data) over het gehele accumulatie-domein is lastiger; het recente paper van Loder et al. (2019) doet dat wel voor enkele tientallen steden en laat zien dat in de praktijk inderdaad niet het hele accumulatie-domein voorkomt. Er zijn nog veel open onderzoeksvragen, bijvoorbeeld over welke netwerk-karakteristieken de vorm van het MFD het meest beïnvloeden (topologie, verkeersregelingen, gedrag).

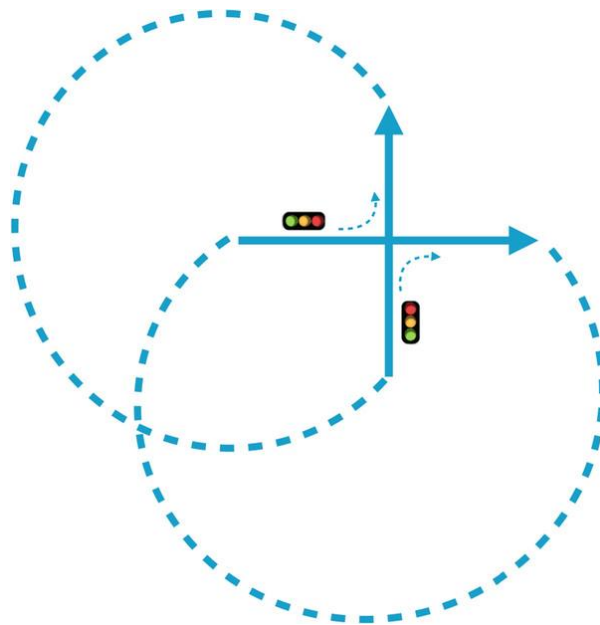
Wel duidelijk is dat het MFD, hoewel misschien enigszins grof, een goed stuk gereedschap kan zijn om prijsmaatregelen door te rekenen, mogelijk ook real-time. In dit artikel bespreken we daarom een aantal resultaten van onderzoek binnen U-Smile waarin verschillende aspecten van het MFD centraal staan. Sommige zijn theoretisch van aard en geven inzicht hoe verschillende omstandigheden het MFD beïnvloeden en sommige zijn meer toegepast van aard. In sectie 2 bekijken we hoe verkeerslichten potentieel de vorm van het MFD beïnvloeden. In sectie 3 laten we zien dat iets meer verkeer toelaten in een netwerk dan de kritische accumulatie niet noodzakelijk nadelig hoeft uit te pakken.

Het belangrijkste resultaat komt in sectie 4. Daar introduceren we het contra-intuïtieve idee dat de vorm van het MFD bepaald wordt door de vertrektijdstoppen. Alle netwerkeigenschappen zitten dan in de vertrektijdstopcurve. Het wenkend perspectief daarvan is dat door het sturen en/of beïnvloeden van vertrektijdstopkeuzes (bijv. door prijsmechanismen) niet alleen de verkeersstroom in het netwerk op dat moment kan worden beïnvloed, maar ook de relatie tussen het aantal mensen en de verkeersstroom, daarmee de capaciteit van dat netwerk. Slim regelen van vertrektijdstoppen heeft dus nog meer potentie om congestie in netwerken op te lossen dan we al dachten. In sectie 5 laten we tenslotte zien hoe het MFD gebruikt kan worden voor het simuleren van verkeer in grote netwerken, bijvoorbeeld om grofmazig de effecten van vervoermanagement in kaart te brengen. In sectie 6 presenteren we de overkoepelende conclusies.

## 2. Effect van verkeerslichten op MFDs

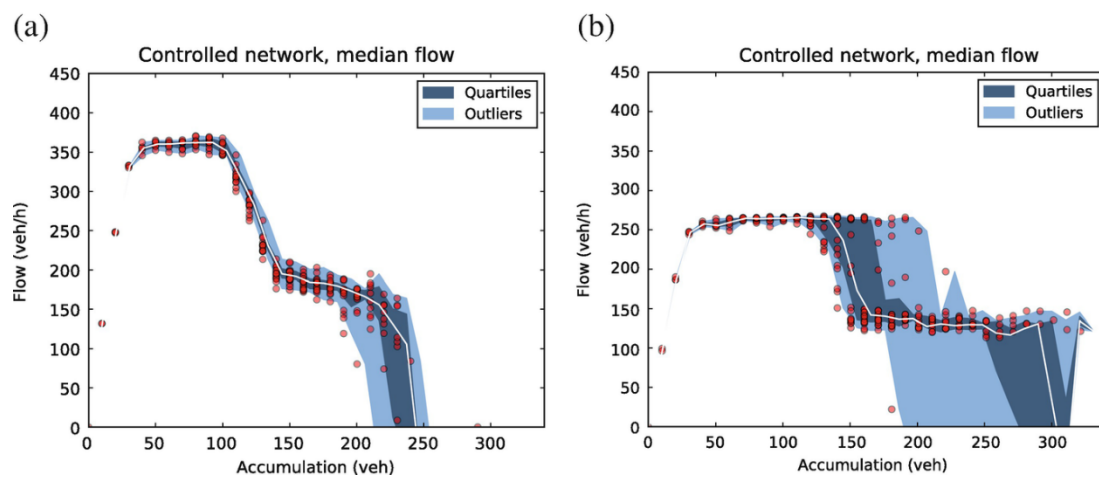
In vroege publicaties van het MFD werd de vorm als vast aangenomen Daganzo en Geroliminis (2008). We weten ondertussen dat de vorm afhangt van de snelheid waarmee een netwerk drukker wordt (Daganzo et al., 2011) en de precieze manier waarop verschillende wegen aan elkaar zitten (de topologie van het netwerk, Knoop et al. (2014)). Ook verkeerslichten kunnen een rol spelen. Eerder gaven Gayah et al. (2014) al aan dat verkeer in netwerken uiteindelijk instabiel kan worden als er geen verkeersregelingen in de vorm van verkeerslichten zijn.

Binnen het kader van verkeersmanagement door vraagbeperking is het essentieel te weten hoe veel verkeer er in een zone kan worden gelaten zonder dat de prestatie van het netwerk achteruit gaat. In eerste benadering is er één accumulatie (i.e., aantal auto's) waarbij de doorstroming maximaal is. Zodra de instroom zo hoog wordt dat de accumulatie groter wordt dan de kritische accumulatie, wordt de uitstroom minder en komt het verkeer in een vicieuze cirkel terecht: minder uitstroom betekent nog meer verkeer in de zone, betekent nog minder uitstroom, wat nog meer verkeer in de zone betekent, etc. Het principe dat bij de introductie van het MFD (Daganzo, 2007) gepresenteerd werd, is de instroom beperken om zo de uitstroom op peil te houden. Wij willen nu echter naar een andere manier kijken: de doorstroming gelijk houden terwijl er toch meer voertuigen aanwezig zijn. Zo kunnen we de negatieve gevolgen van te veel verkeer omzeilen.



Figuur 2: Het geïdealiseerde grid-netwerk, uit Zwaal et al. (2017)

Daartoe zetten we een micropische verkeerssimulatie op met wegen met kruispunten, waarbij we elk voertuig simuleren en tevens de toestand van de verkeerslichten simuleren. Om dit idee te toetsen kiezen we, geïnspireerd op Daganzo et al. (2011), voor een geïdealiseerd model van een oneindig grid netwerk (zie figuur 2). In dit netwerk is een oneindig lange noord-zuid verbinding en een oneindig lange oost-west verbinding. Deze wegen zijn oneindig lang omdat ze zogenaamde periodieke randvoorwaarden hebben: het einde van de weg is weer het begin van dezelfde weg. De wegen kruisen bovendien met elkaar. Aangezien beide wegen periodieke randvoorwaarden hebben, kruisen ze elkaar op regelmatige intervallen, en zijn ze goed te gebruiken als model voor een grid-netwerk. Dat wil zeggen, de fenomenen die op dit netwerkje plaatsvinden, komen ook voor op echte (grid) netwerken, en de lessen die we leren op het ideale netwerk zijn indicatief voor wat er in de echte wereld mogelijk is.



Figuur 3: Het MFD zonder (links) en met (rechts) verkeerslichten, uit Zwaal et al. (2017)

Dit netwerk gaan we simuleren met een aantal auto's in één simulatie constant blijft. Dat geeft een constante accumulatie. Daarna herhalen we de simulatie met een ander aantal auto's. De kans om van rijrichting te wisselen is voor elke auto 50% elke keer als hij bij een kruising aankomt. We

variëren we de initiële accumulatie in stappen van 10 van 0 tot 160 per rijrichting (dus 17 niveaus), wat leidt tot in totaal  $17 \times 17 = 289$  simulaties.

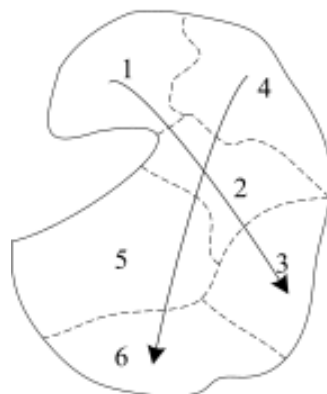
Figuur 3(a) en (b) tonen de resulterende MFDs met en zonder verkeerslichten. We zien daarbij drie verschillen tussen de situatie met en zonder verkeerslichten. Dat zijn, gepresenteerd in volgorde van toenemend belang voor verkeersmanagement:

1. Voor lage accumulaties zijn de intensiteiten (en dus de snelheden) hoger zonder verkeerslichten. Dat is te verklaren doordat mensen niet onnodig voor rode verkeerslichten hoeven te wachten
2. Er zijn met verkeerslichten hogere accumulaties mogelijk bij dezelfde productie. Dat is te verklaren doordat de drukte door de verkeerslichten beter verdeeld kan worden over de verschillende delen van het netwerk. Zonder verkeerslichten staat een deel van het netwerk vast en geeft dat problemen ook in het andere deel. Door de verkeerslichten wordt die drukte verdeeld.
3. Verkeerslichten zorgen ervoor dat tot op hogere dichtheid de intensiteit ook hoog blijft. Dit is belangrijk omdat zo dus minder mensen door maatregelen een ander vertrektijdstip hoeven te kiezen. De uitstroom stijgt weliswaar niet, maar deze mensen hinderen ook het overige verkeer niet zodanig dat het verkeer vastloopt.

We kunnen de redenering ook omdraaien: door in het netwerk verkeerslichten op strategische plaatsen te zetten, kan er meer verkeer in het netwerk toegelaten worden dan zonder die verkeerslichten. Daaruit blijkt dus dat de hoeveelheid verkeer bepaalt welke verkeersmanagementmaatregel geïmplementeerd moet worden. Later (in hoofdstuk 4) laten we ook zien dat de afwikkeling bepaald wordt vanuit de vraag. Verkeersvraag en verkeersmanagement zijn dus 1-op-1 met elkaar verbonden, en dienen dus samen opgepakt worden.

### 3. Nut van tijdelijk te veel verkeer

Het basisidee van verkeersregeling met het MFD (Daganzo, 2007) is dat je niet te veel verkeer moet toelaten in een zone. Immers, te veel verkeer in een zone betekent een lagere uitstroom en daarmee meer vertraging. Als je het verkeer buiten die zone kan laten wachten, heeft het geen effect op de uitstroom uit de zone, en is de uiteindelijke vertraging lager – dit ondanks dat er vertragingen in de zone zijn. Daarom worden er veel regelmechanismen ontwikkeld om in een zone het verkeer te beperken tot een bepaalde hoeveelheid waarbij de uitstroom maximaal is (bijv Keyvan-Ekbatani et al. (2012)). In dit hoofdstuk kijken we of dat altijd de beste strategie is. Daarnaast vergelijken we die strategie met de strategie om instroom aan het begin te verkleinen (door het beïnvloeden van vertrektijdstippen).



Figuur 4: Het bestudeerde netwerk.

We ontwerpen een meer realistisch scenario waarbij er niet een zone is waar al het verkeer heen moet, maar een netwerk met kruisende stromen, zie figuur 3. Daarbij zijn er 2 stromen die elkaar kruisen in zone 2. De vraag die we hier willen beantwoorden is of het beperken van de instroom in zone 2 altijd tot lagere reistijden leidt.

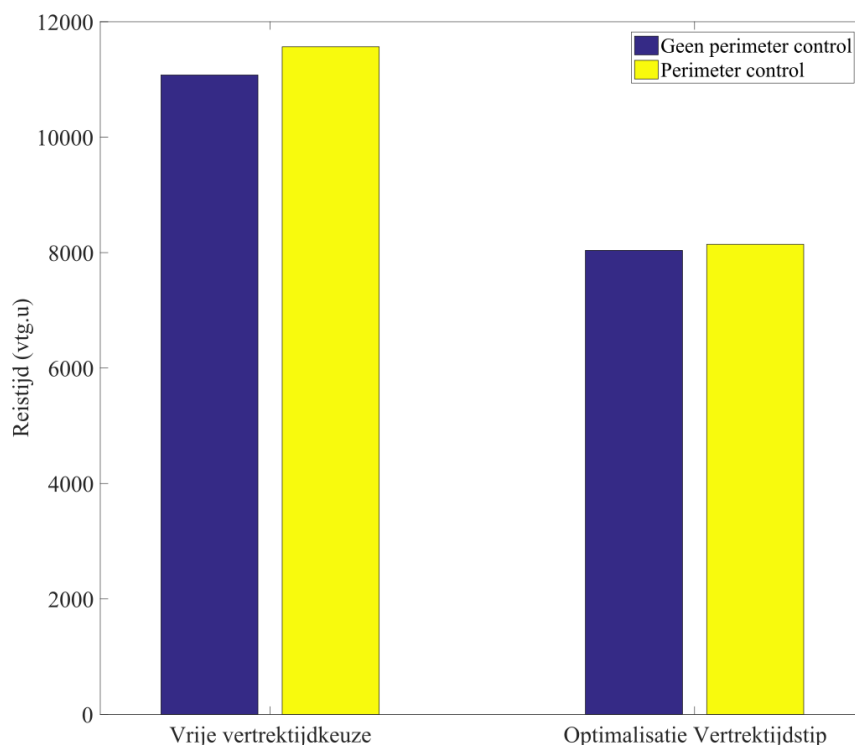
We nemen aan dat het vertrekprofiel gegeven is en maken gebruik van een verkeerssimulatie die werkt met zones als kleinste element, het Netwerk Transmissie Model, zie Knoop en Hoogendoorn (2015). Daarbij vergelijken we een situatie met en zonder “perimeter control”. Dat wil zeggen: we hebben (1) geen beperking voor de instroom, of (2) beperking voor de instroom in elke zone zodat de accumulatie behorend bij de maximale accumulatie niet overschreden wordt. Voor (2) beperken we de instroom in elke zone zodanig dat zijn kritische accumulatie niet overschreden wordt. Praktische beperkingen (hoe kan de instroom beperkt worden; staan er wel verkeerslichten aan de rand?) en de gevolgen (wat betekent dat voor een naburige zone) worden niet meegenomen.

Een andere mogelijke vorm van het regelen van verkeer is het verkeer op een andere manier over de spits verdelen. We kijken tevens naar de effectiviteit van die maatregel. Daarvoor maken we gebruik van een numerieke optimalisatie waarbij we het vraagpatroon veranderen en zo een optimale netwerkprestatie proberen te vinden. Een randvoorwaarde is wel dat alle mensen in de spits reizen – er mogen geen mensen helemaal thuisblijven.

In totaal vergelijken we 4 scenario’s: met en zonder perimeter control, en met en zonder optimalisatie van vertrektijden. De totale reistijden zijn weergegeven in figuur 5. Het blijkt dat:

1. Veruit het grootste effect is te bereiken met het beïnvloeden van de vertrektijdkeuze. Perimeter control heeft een veel kleiner effect

2. In onze specifieke situatie is het effect dat perimeter control heeft zelfs negatief. Met andere woorden, het tegenhouden van verkeer aan de randen, kan ook de reistijd (voor het gehele systeem!) verhogen.



Figuur 5: Reistijden per scenario.

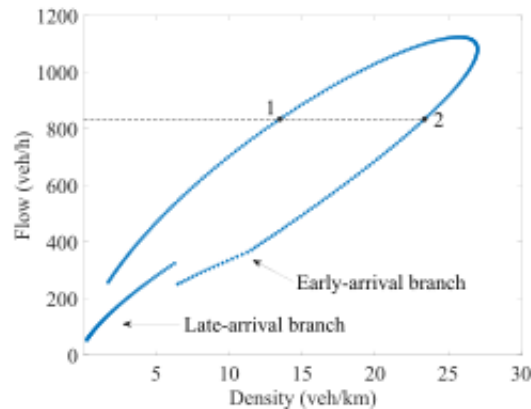
Kortom: we vinden dat het beïnvloeden van het vertrektijdstip veruit het grootste effect heeft, en dus een maatregel is waarop we verder moeten ingaan – dit is geen nieuws, maar het is wel belangrijk om te blijven herhalen. Het regelen met perimeter control (instroombeperking) kan erg nuttig zijn, en andere studies geven dat ook als belangrijkste maatregel aan in vergelijking met verkeerslichtregelingen. Echter, het kan ook een averechts effect hebben, en dat is een nieuw resultaat dat verder dient worden te bestudeerd. Ons advies is om deze maatregel daarom selectief toe te passen, en alleen in die situaties waarin we de effecten daarvan op meerdere aan elkaar gekoppelde zones kunnen overzien.

#### 4. Impact van vertrektijdstipkeuze op MFD

Tot nu toe hebben alle studies het MFD als resultante beschouwd van verkeer dat op een netwerk komt. Het MFD kan (gedeeltelijk) worden beschouwd als verschijnsel dat voorkomt uit de onderliggende dynamica van files en verkeerstromen in en uit een netwerk; die zijn op hun beurt weer (gedeeltelijk) te beschouwen zijn als verschijnselen die voortkomen uit het onderliggende rij- en routekeuze gedrag. Op die manier is het MFD een bovenste van 3 lagen, die de onderliggende lagen ook beschrijft. Het MFD is daarmee belangrijk gereedschap in hiërarchische verkeersregelingen, en is in de afgelopen 10 jaar zeer uitgebreid gebruikt in het ontwerpen van met name instroom-regulering.

Echter, waarom de vorm van het MFD is zoals hij is (Figuur 1), en bijvoorbeeld waarom MFDs op basis van echte data (Lodier et al, 2019) er zo anders uitzien dan MFDs gesampled door middel van simulatie, is onderbelicht gebleven. In een MFD uit metingen (“echte data”) zien we meestal niet meer dan de linker tak van het MFD tot ietsje voorbij de kritische accumulatie (de blauwe arcering in Figuur 1). In deze sectie benaderen we het MFD niet vanuit de onderliggende verkeersprocessen (micro- of macroscopische simulatie van een netwerk), maar vanuit het oogpunt van aankomst- en vertrekcurven. Daarmee laten we een aantal eigenschappen van het MFD zien zonder dat we van een netwerk gebruik maken. Het blijkt dat inderdaad op deze wijze een aantal generieke eigenschappen van het MFD te vinden zijn, en bovendien duidelijk wordt waarom de karakteristieke “omgekeerde U” met echte data slecht te construeren is (en met simulatie wel).

Daarvoor gaan we verkeer benaderen vanuit vertrektijdstip keuze en nemen we aan dat er gebruikersevenwicht is in vertrektijdstipkeuze. We nemen aan dat er één zone is, dat alle gebruikers van die zone dezelfde vaste ideale aankomsttijd hebben, en dat ze allemaal het even erg vinden om vertraging op te lopen, allemaal even erg vinden een beetje te vroeg te komen en allemaal even erg vinden te laat komen. Dat kwantificeren we door lineaire kosten aan te nemen voor reistijd, en voor te vroeg en te laat reizen, die alle drie met een eigen parameter ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) worden beschreven. In een gebruikersevenwicht kan een gebruiker geen beter vertrektijdstip kiezen en daarmee zijn eigen (totale) kosten (inclusief die door te vroeg of te laat komen) verlagen. Hierdoor zijn de totale kosten van het reizen op elk tijdstip gelijk. Sommige reizigers komen op tijd met een langere reistijd en sommigen reizen te vroeg of laat met een kortere reistijd. Natuurlijk zijn dit allemaal simplificaties van de werkelijkheid, maar ze zijn zeer bruikbaar om fenomenen te tonen. Een verklaring voor een gebruikersevenwicht in vertrektijdstipkeuze is dat reizigers (gemiddeld genomen) na verloop van tijd leren wat het beste tijdstip is om van huis te gaan en welke consequentie (te vroeg, op tijd, te laat) die keuze (gemiddeld) heeft. Tenslotte nemen we aan, gebaseerd op empirische gegevens, dat de cumulatieve vertrekken via een S-curve volgen: eerst een lage vertrek rate (aantal vertrekken per eenheid tijd), dan meer, en dan minder.



Figuur 6: Het MFD op basis van gebruiksevenwicht.

Gebruikmakend van deze theoretische uitgangspunten kunnen we een MFD creëren. Dat ziet er bepaald niet zo scherp uit als de empirische data van Geroliminis and Daganzo (2008). Integendeel: we vinden verschillende lijnen en een discontinu diagram, zie figuur 6. De discontinuïteit is terug te voeren op het feit dat de kosten voor een late aankomst anders zijn dan voor een vroeg vertrek. Daardoor zien we een plotse verandering van uitstroom.

Een tweede belangrijke eigenschap die we zien is dat er geen zogenaamde congestietak is. Dat wil zeggen dat in het MFD dat hieruit volgt, de productie alleen maar stijgt met toenemende accumulatie. Dit is in tegenstelling tot veel MFDs die in simulatie gevonden zijn, waar we zien dat de uitstroom daalt als er te veel voertuigen in het netwerk zijn. We zien hier dat deze toestand niet voorkomt binnen onze aannames: gebruikersevenwicht in termen van vertrektijdstip (niemand kan een betere tijd kiezen om weg te gaan) en toe- en daarna afnemende instroom. Toestanden op de congestietak van het MFD vind je dus alleen in (a) simulaties waar je gebruikersevenwicht zou verwachten, maar waar dat niet geïmplementeerd of geverifieerd is of (b) situaties waar geen gebruikersevenwicht is, bijvoorbeeld bij ernstige verstoringen (grote evenementen of incidenten). Dit wordt ondersteund door empirische data: Loder et al. (2019) geeft de empirische MFDs voor enkele tientallen steden en de congestietak is zelden zichtbaar.

Dit resultaat is belangrijk om een aantal redenen. Allereerst blijken er kenmerken van MFDs te zijn die we wel in de praktijk waarnemen en niet in simulatie. Die kenmerken vinden we door alleen een evenwicht aan te nemen, en dus zonder een netwerk te kiezen. Het feit dat er dus blijkbaar eigenschappen van een MFD zijn die theoretisch onderbouwd onafhankelijk zijn van een netwerk is een nieuw inzicht. Ten tweede, vertrektijdstipkeuze kan congestie (i.e., de congestietak van het MFD) voorkomen, ook zonder externe prijsprikkels. Daarnaast is er nog een mogelijke conclusie die verder getoetst moet worden. In ons deterministische voorbeeld zijn alle gebruikers gelijk in hun kostenwaardering. Het zou kunnen dat dat de oorzaak is dat de congestietak niet voorkomt, en dat de gelijkheid in totale reiskosten daarmee gunstig is voor de netwerkprestatie. Deze interpretatie is heel interessant om in meer detail te onderzoeken, omdat deze in ieder geval gevoelsmatig afwijkt van de differentiëring die doorgaans gekoppeld wordt aan beprijzen.

## 5. Netwerk-modellering voor de hele Randstad

In deze laatste sectie laten we zien dat het MFD of niet alleen geschikt om in te zetten als geïsoleerd “badkuipmodel” met één zone, bijvoorbeeld om prijsstrategieën door te rekenen, maar ook als manier om heel grof de verkeersdynamica van een groot gebied door te rekenen. Uiteraard is dat een heel grove benadering, maar met name voor ruimtelijk economische (regionaal ruimtegebruik) toepassingen ligt deze aanpak veel meer voor de hand dan toepassen van zeer gedetailleerde verkeerstoedelingsmodellen. Het concept van het MFD werkt prima voor het beschrijven van



productie en accumulatie in een homogene zone (waarin verkeer gelijkmatig is verdeeld, Daganzo (2007)). In de praktijk zijn de zones niet homogeen, zoals de eerdere secties ook al aangeven, en belangrijker, er zijn in de praktijk ook meer zones in een samenhangend systeem. Immers, we kunnen de ritten die gemaakt worden in de Randstad niet los van elkaar zien: een rit van Amsterdam naar Rotterdam kan de reistijd van een rit van Scheveningen naar Utrecht beïnvloeden. Daarom is het nodig een model te hebben waarin het hele verkeerssysteem van de Randstad meegenomen wordt.

Gezien de grote mate van heterogeniteit volstaat het niet om de Randstad als één zone in het perspectief van een MFD. Immers, er zijn wel effecten, maar voor het geheel geldt niet een first-in-first-outprincipe, en ook vertragingfuncties zijn sterk afhankelijk van de relaties tussen de richtingen. We hebben daarom het concept van het MFD ingezet om een model van de hele Randstad te maken, gecentreerd rond de grote kernen in de Randstad (Figuur 7(a)). De overige gemeenten hebben we toegevoegd aan de zone met de dichtstbijzijnde grote kern. Dat levert de volgende zones op: Den Haag, Nissewaard, Rotterdam, Dordrecht, Gouda, Zoetermeer, Leiden, Alphen aan den Rijn, Haarlem, Amsterdam, Hilversum, Amersfoort, Utrecht, Almere, Zaanstad, en Purmerend (Figuur 7(b))



(a) Raw zone map after merging multiple zones in agglomerations



(b) Final zone map, after re-arranging the boundaries of the left figure

Figuur 7: Zonering voor het MFD model van de randstad; (a) eerste ruwe zone kaart; (b) definitieve zonering.

Het idee is nu om het verkeer in elk van die zones te representeren met een MFD. Met andere woorden, we hebben een model gemaakt waarbij de eenheid van aggregatie een zone is. Er waren geen geschikte verkeersstromingsmodellen om met meervoudige zones met verschillende type verkeer te rekenen, en daarom hebben een nieuw model ontwikkeld op basis van een aantal elementen van bestaande modellen. De uitgangspunten van dit nieuwe model zijn:

1. Er zijn twee categorieën verkeer per zone: lokaal verkeer en doorgaand verkeer (te denken valt aan snelwegverkeer).
2. De snelheid per zone en categorie is voor de hele zone gelijk, en wordt bepaald door de dichtheid
3. De lengte van de trip in een zone van een voertuig wordt bepaald door zijn herkomst en bestemming voor die zone (i.e., intern of de grens met een bepaalde buurzone).

De MFDs voor de zones zijn bepaald op basis van de hoeveelheid weglengte van elke categorie (snelweg, gebiedsontsluitingsweg, ...). We hebben daarbij een specifiek MFD voor elke weg categorie aangenomen en een gewogen gemiddelde genomen van deze MFDs, met weglengte

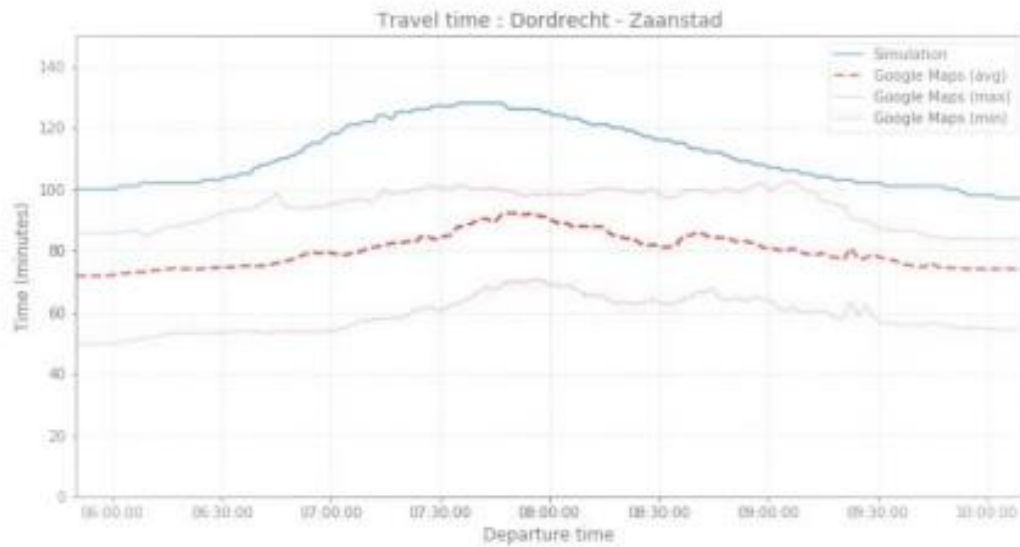
als wegingsfactor. Merk op dat dit een erg grove inschatting is, en bijvoorbeeld voorbij gaat aan de kwaliteit van de specifieke verkeersregeling. De HB-matrix is bepaald met een eenvoudig “zwaartekracht-achtig” model. Meer huishoudens en meer banen betekenen grotere attractie en een grotere afstand betekent een kleinere attractie. Een aantal voorbeelden van de vraagpatronen voor 3 HB-relaties is gegeven in figuur 8.



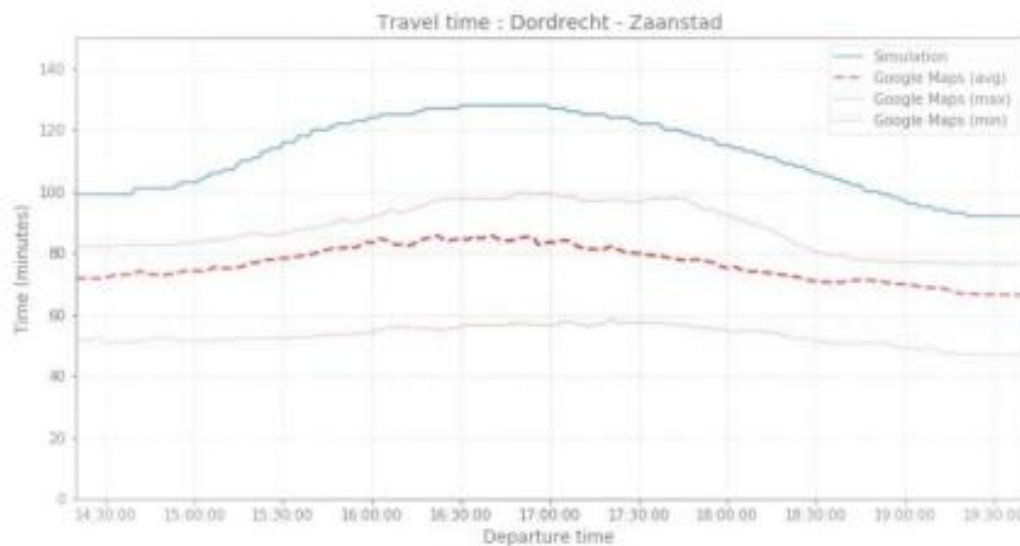
Figuur 8: Vraag voor 3 HB-relaties als functie van de tijd van de dag

Het model is vervolgens getest op de Randstad. De crux voor een model op dit schaalniveau is of de reistijden en momenten van file tussen zones enigszins overeenkomen. Het is niet de verwachting dat de reistijden tot op de minuut overeenkomen. Het model is goed bruikbaar als er op het goede moment wordt voorspeld dat er files ontstaan, en de reistijd daarmee hoger wordt op een manier die overeenkomt met wat er grosso modo in de data zichtbaar is. Voor de data van reistijden gebruiken we de data van Google Maps. Voor de verschillende HB-relaties kunnen we de reistijden als functie van vertrektijdstip (met marge) bepalen. Het is gezien de beperkte ruimte van dit artikel niet mogelijk om op alle resultaten te presenteren.

Over het algemeen zien we de patronen goed terug: (1) de orde van grootte van de reistijd klopt, (2) de orde van grootte van de vertraging klopt en (3) de momenten van vertraging komen enigszins overeen. Dat geldt niet voor alle HB-relaties en alle zones, maar wel grotendeels. Een typisch voorbeeld is de reistijd voor een HB-relatie door de hele Randstad, Dordrecht-Zaanstad, geïllustreerd in figuur 9. Alhoewel er nog veel valt fijn te slijpen is dit model uitermate geschikt om te kijken naar de effecten van de vermindering van de verkeersvraag per HB-relatie voor de overall reistijden. Deze analyses worden nu uitgevoerd en daarop kunnen we in een ander artikel terugkomen.



(a) Morning peak



(b) Afternoon peak

Figure 5.5: The travel time plots for the route Dordrecht - Zaanstad

Figuur 9: Reistijden voor Dordrecht-Zaanstad in ochtend- en avondspits

## 6. Conclusies

In dit artikel zijn we in vogelvlucht langs een aantal onderzoeksprojecten gegaan in het kader van U-Smile waarin het macroscopisch fundamenteel diagram (MFD) of “badkuipmodel” centraal staat. De belangrijkste punten zijn:

- Goed ontworpen verkeerslichtenregelingen zijn cruciaal voor effectief management van zones en (sub)netwerken. Soms is het dan zelfs niet erg dat er in een zone tijdelijk meer verkeer is dan het waarvoor de maximale prestatie wordt geleverd. File kan dus soms nuttig zijn! Dit kan voor het gehele netwerk toch efficiënter zijn. Dat hangt af van de verkeersvraag. Ook hangt het aantal auto's

waarvoor de prestatie maximaal is, af van de verkeersregeling. Meer in het algemeen blijkt daarmee dus dat vraagmanagement en verkeersmanagement met elkaar samenhangen, en pas als die (netwerkbreed) gecombineerd worden ingezet, de maximale effectiviteit bereikt wordt.

- Onder de aanname van een gebruikersevenwicht blijkt dat de vorm van het MFD sterk wordt beïnvloed door het vraagpatroon, ongeacht het netwerk. De vorm hangt af van de aannamen daarin. Dit is een fundamenteel nieuw inzicht, dat het hoogste hiërarchische niveau in verkeersregelingen niet het gevolg is van de onderliggende verkeers-niveaus. Dat betekent ook dat er direct gestuurd kan worden op dit niveau door middel van vraag-beïnvloeding. Een mogelijk gevolg is dat gelijkheid in (totale) reiskosten door keuzes van de bestuurders leidt tot het voorkomen van congestie. Dit heeft mogelijk consequenties voor het ontwerp van (nieuwe) prijsmechanismen.

- Het is mogelijk om het MFD te gebruiken voor het simuleren van verkeer in hele grote netwerken (van de grootte Randstad) met verschillende zones. Dit soort modellering kan ingezet worden om ruimtelijk-economische verkenningen te ondersteunen.

## Referenties

- Daganzo, C. (2007). Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(1):49–62.
- Daganzo, C. F., Gayah, V. V., and Gonzales, E. J. (2011). Macroscopic relations of urban traffic variables: Bifurcations, multivaluedness and instability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1):278–288.
- Gayah, V. V., Gao, X. S., and Nagle, A. S. (2014). On the impacts of locally adaptive signal control on urban network stability and the macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70:255–268.
- Geroliminis, N. and Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9):759–770.
- Keyvan-Ekbatani, M., Kouvelas, A., Papamichail, I., and Papageorgiou, M. (2012). Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10):1393–1403.
- Knoop, V. L., De Jong, D., and Hoogendoorn, S. P. (2014). Influence of road layout on network fundamental diagram. *Transportation Research Record*, 2421(1):22–30.
- Knoop, V. L. and Hoogendoorn, S. P. (2015). An area-aggregated dynamic traffic simulation model. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 15(2).
- Loder, A., Ambühl, L., Menendez, M., and Axhausen, K. W. (2019). Understanding traffic capacity of urban networks. *Scientific reports*, 9(1):1–10.
- Zwaal, B., Knoop, V. L., and van Lint, H. (2017). The effect of traffic signals on the macroscopic fundamental diagram. In *International Conference on Traffic and Granular Flow*, pages 37–44. Springer.