

Een nieuwe kijk op verkeersafwikkeling in netwerken

In deze tutorial bespreken we de nieuwste inzichten op het gebied van netwerkdynamica. En nu eens niet op de traditionele manier, waarbij we proberen om een verkeersnetwerk in al haar detail zo nauwkeurig mogelijk te analyseren, modelleren en simuleren. Nee, in deze bijdrage zullen we juist vanuit vogelperspectief naar de verkeersafwikkeling in een netwerk kijken. Onze leidraad hierbij is het *netwerk fundamenteel diagram*.

Of het nu gaat om een ex-ante evaluatie van verkeersmanagementmaatregelen, het genereren van kortetermijnvoorspellingen, of om het ontwerpen van verkeersregelingen: inzicht in hoe het verkeer zich in een netwerk gedraagt, is voor wegbeheerders essentieel. In de afgelopen decennia hebben onderzoekers dan ook een groot aantal modellen gebouwd die deze afwikkeling beschrijven. Daar zijn zij lang niet altijd in geslaagd: om goed te kunnen voorspellen zijn nauwkeurige mathematische modellen nodig die het gedrag van de individuele weggebruiker en zijn interactie met andere weggebruikers, de infrastructuur, de verkeersmanagementsystemen etc. kunnen reproduceren – en dat is bepaald geen sinecure. De voor de hand liggende manier om de modellen te verbeteren, is het (nog) nauwkeuriger beschrijven van de processen die leiden tot wat we in een netwerk kunnen waarnemen. Een heel andere benadering is om te kijken of we de afwikkeling juist op een hoger aggregatieniveau kunnen beschrijven, bijvoorbeeld door te kijken hoe het verkeer in een netwerk zich gemiddeld gedraagt. Maar kunnen we op een hoog aggregatieniveau wel iets zinnigs zeggen over 'gemiddeld gedrag'?

Het fundamenteel diagram voor netwerken

In 2008 publiceerden Daganzo en Geroliminis [1]* de resultaten van een interessant experiment. De vraag die zij zich hadden gesteld, is of er een verband bestaat tussen het aantal voertuigen in het netwerk – de accumulatie N of de gemiddelde dichtheid k – en de zogenaamde 'exit rates' E of prestatie P (soms ook aangeduid met q). Met de exit rate bedoelen we de snelheid waarmee verkeer haar bestemming bereikt, uitgedrukt in aantal voertuigen per uur, en de

prestatie staat voor het aantal voertuigkilometers per uur. Daganzo en Geroliminis bestudeerden de resultaten van zowel een simulatie-experiment als een praktijkexperiment. De relatie tussen beide variabelen bleek opvallend scherp, gegeven dat de condities in het netwerk aan bepaalde voorwaarden voldoet. Zie figuur 1.

Deze relatie tussen de dichtheid en de exit rates in een verkeersnetwerk noemen we het *netwerk fundamenteel diagram*, kortweg NFD.** De condities waaronder een mooi verband kan worden vastgesteld, blijken echter nogal stringent: er moet sprake zijn van een homogene verdeling van verkeer over het netwerk. Omdat dit in de praktijk zelden het geval is, zijn onderzoekers van de TU Delft in 2012 op zoek gegaan naar een manier om ook bij een niet-homogene verdeling de verkeersafwikkeling op geaggregeerde wijze te beschrijven [2]. Uit dit onderzoek bleek dat we dan een derde grootheid moeten introduceren: de ruimtelijke spreiding van de dichtheid σ . Als het verkeer homogeen is verdeeld, geldt dat $\sigma = 0$, wat wil zeggen dat de dichtheid k op elk wegvak identiek is. Is er sprake van heterogene verdeling van het verkeer dan is $\sigma > 0$. Hoe groter het getal, hoe groter het gemiddelde verschil tussen de dichtheid in het netwerk.

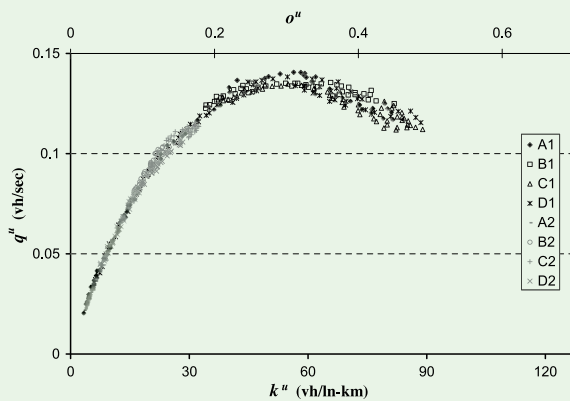
Na uitvoerige data-analyse en het uitvoeren van vele simulatie-experimenten blijkt dat de eerdergenoemde prestatie P heel nauwkeurig kan worden beschreven als een functie van de dichtheid k en de ruimtelijke spreiding in de dichtheid σ :

$$P = P(k, \sigma)$$

Daarmee maken we de theorie van het NFD generiek, en we komen daarmee tot een *generiek* netwerk fundamenteel diagram, g-NFD. Ter illustratie toont figuur 2a deze relatie voor data van de ringweg A10 (linksom). In deze figuur is een maand data verwerkt: werkdagen, weekenddagen, dagen met incidenten, zonder incidenten enzovoort. Figuur 2b toont op basis van diezelfde data de gemiddelde snelheid voor het hele netwerk als een functie van de dichtheid k en de spreiding σ .

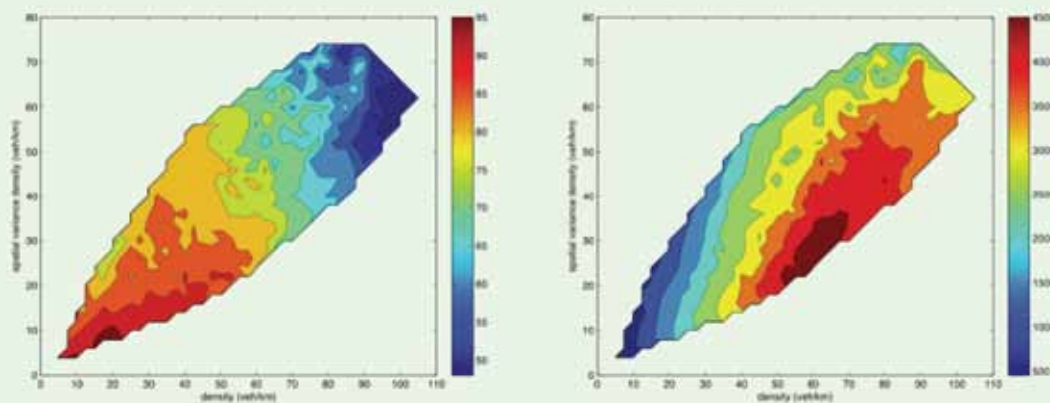
* Raadpleeg voor de bronverwijzingen de online versie van dit artikel, op NM-Magazine.nl/download.

** In onze eerste tutorial in NM Magazine 2012 #3 schreven we over het 'fundamenteel diagram'. Die beschrijft de relatie dichtheid-intensiteit op het niveau van een weg of wegvak. Het 'netwerk fundamenteel diagram' daarentegen beschrijft de relatie dichtheid-prestatie op netwerkniveau.



Figuur 1

Een voorbeeld van de relatie netwerkdichtheid k en prestatie q voor Yokohama. De figuur is vastgesteld op basis van gps-data van taxi's.
Bron: Daganzo en Geroliminis.



Figuur 2a

(links) en 2b: Het generiek netwerk fundamenteel diagram van de ringweg A10 (linksom) waarin de gemiddelde snelheid (2a) en gemiddelde intensiteit (2b) worden uitgedrukt als functie van de gemiddelde dichtheid en de ruimtelijke spreiding in de dichtheid.

Netwerkdynamica

Laten we nu eens kijken hoe de verkeersstoestand in een netwerk zich *gedurende de dag* kan ontwikkelen. Als basis nemen we het vlak uit figuur 2a. Zoals we hierboven opmerkten, is hierin een complete maand aan data van de ringweg A10 verwerkt, maar we zoomen nu in op twee specifieke dagen: een reguliere dag zonder incidenten (figuur 3) en een dag waarop sprake was van een ernstig incident (figuur 4). Deze dagen zijn weergegeven als een lijn: het traject $(k(t), \sigma(t))$, oftewel de gemiddelde dichtheid (x-as) en de ruimtelijke spreiding van die dichtheid (y-as) als functie van de tijd. De roze bolletjes op de lijn geven de verschillende tijdstippen op de betreffende dag aan, waarbij '18' staat voor 18.00 uur, '18,5' voor 18.30 uur enzovoort. NB: De kleuren in de figuren 2a, 3 en 4 duiden de gemiddelde snelheid aan. Blauw betekent een lage snelheid (congestie), terwijl rood juist een hoge gemiddelde snelheid is. In figuur 3, de reguliere dag zonder incidenten, zien we dat er sprake was van een zware avondspits die tussen 17.30 en 18.00 uur leidde tot de laagste gemiddelde snelheid. De vorm van het traject $(k(t), \sigma(t))$ in deze figuur is een typisch voorbeeld van wat er gebeurt bij een reguliere avondspits in een netwerk als de ringweg A10: de gemiddelde dichtheid neemt toe in met name de avondspits. We zien hetzelfde voor de gemiddelde spreiding: deze neemt grofweg toe als de gemiddelde dichtheid groter wordt. Ook zien we dat wanneer congestie opbouwt, de spreiding lager is dan wanneer de congestie oplost, waardoor een soort lussen ontstaan. Een voorbeeld is de lus vanaf pakweg 15.00 uur tot en met 19.00 uur: de lijn van de 'opbouw' ligt onder die van de 'afbouw' van de congestie. Figuur 4 toont het $(k(t), \sigma(t))$ -pad voor de dag met een incident. Het incident vindt plaats om 19.00 uur op het moment dat de avondspits afloopt. Het incident leidt tot een snelle stijging van de ruimtelijke spreiding en een beperkte stijging van de gemiddelde dichtheid, waardoor er een duidelijk herkenbare lus ontstaat in een richting tegen de klok in. Zowel de forse toename in de spreiding als de beperkte toename in de gemiddelde dichtheid zijn makkelijk te verklaren: de gemiddelde dichtheid neemt (licht) toe, omdat voertuigen minder makkelijk het netwerk kunnen uitrijden. De

spreiding neemt fors toe, omdat er stroomopwaarts van het incident een gebied met zeer hoge dichtheid ontstaat, terwijl stroomafwaarts de dichtheid juist heel erg laag is.

Nucleatie van congestie

In het voorgaande hebben we gezien hoe het g-NFD de prestatie van een netwerk uitdrukt als functie van de drukte in het netwerk en hoe deze drukte over het netwerk is verdeeld. De directe implicaties voor netwerkmanagement liggen voor de hand: bij een betere spreiding van het verkeer over het netwerk, kunnen we een hogere prestatie realiseren!

Maar de noodzaak om verkeer te spreiden is zelfs nog groter dan je in eerste instantie zou denken. Het blijkt namelijk dat files de natuurlijke neiging hebben om samen te klonteren, een verschijnsel dat *nucleatie* wordt genoemd. Om dat te illustreren hebben we het volgende experiment uitgevoerd [3]: beschouw een netwerk met een gridstructuur en een homogene dichtheid (spreiding dichtheid is nul). Voor het netwerk geldt dat verkeer dat aan de ene kant het netwerk uitstroomt, precies ertegenover aan de andere kant van het netwerk weer instroomt. Op die manier blijft de dichtheid in het netwerk constant. Gaan we nu simuleren, dan zien we na enige tijd gebieden ontstaan waar de dichtheid net iets hoger is dan elders. Door onder meer fileterugslag kunnen deze (soms kleine) files nieuwe knelpunten genereren, waardoor de dichtheid plaatselijk nog groter wordt. Stroomafwaarts van deze gebieden neemt de dichtheid alleen nog maar verder af. Laten we dit proces op zijn beloop, dan zien we na enige tijd op sommige plekken hele lage dichtheden, terwijl op andere plekken de dichtheid juist heel groot wordt (zie figuur 5). Er is duidelijk sprake van nucleatie!

Toepassingen

De toepassingen van deze nieuwe inzichten en kwantitatieve relaties zijn legio. Het voert te ver om ze hier allemaal te beschrijven, maar laten we er aantal uitlichten.

Ten eerste beschrijft het g-NFD in een oogopslag misschien wel het belangrijkste kenmerk van een verkeersnetwerk, namelijk hoe de

kwaliteit van de afwikkeling afhangt van de belasting en de spreiding daarin. Dit biedt onder andere mogelijkheden voor het toetsen van de kwaliteit van een verkeersmodel, die tenminste een vergelijkbare relatie zou moeten laten zien. Veel dynamische verkeersmodellen laten nu nog onrealistische relaties zien tussen de gemiddelde dichtheid in het netwerk en de prestatie van het netwerk, wat ernstige twijfels zou moeten oproepen over de voorspellende kwaliteit van deze modellen! Overigens zijn we bij de TU Delft momenteel druk doende om dynamische modellen te ontwikkelen die direct gebaseerd zijn op het g-NFD.

Een andere belangrijke toepassing is het bepalen van het geboden serviceniveau in een netwerk. Deze toepassing is uitgebreid aan de orde gekomen in eerdere uitgave van NM Magazine, bij de beschrijving van de regelaanpak uit de Praktijkproef Amsterdam.*** Daar wordt de kracht van de ingrepen afgestemd op de afwikkeling in het netwerk.

Het is ook mogelijk om met g-NFD de robuustheid van een netwerk inzichtelijk te maken. Met andere woorden: hoe goed (of slecht) reageert een netwerk op een (ernstige) verstoring? Eerder lieten we zien hoe het $(k(t), \sigma(t))$ -pad zich ontwikkelt tijdens een incident. We zagen hier vooral een forse toename in de spreiding. Het g-NFD laat zien hoe deze toename samenhangt met een verandering in de gemiddelde snelheid of de gemiddelde intensiteit in het

netwerk. Hoe minder de snelheid of intensiteit afneemt bij een toename in de spreiding, hoe robuuster het netwerk is. Dit inzicht is belangrijk om gerichte maatregelen te kunnen ontwikkelen die de robuustheid vergroten.

Tot slot zijn er verschillende toepassingen binnen verkeersmanagement, met name voor de aansturing van toeridoseerinstallaties en verkeersregelinstallaties die de gemiddelde dichtheid in een gebied beheersen. Omdat het g-NFD een duidelijke kritische dichtheid laat zien, kunnen we vrij eenvoudig bepalen hoeveel verkeer in het netwerk optimaal is vanuit doorstromingsperspectief en er (dus) ook voor zorgen dat de hoeveelheid verkeer beneden deze kritische grens blijft. We noemen deze regelstrategie *gating*.

Aardbeving

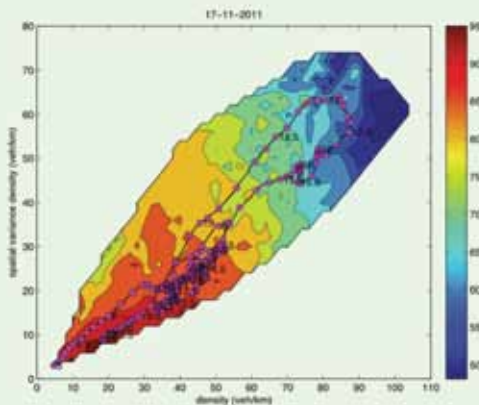
Het netwerk fundamenteel diagram en de recente uitbreidingen erop hebben voor een kleine aardbeving gezorgd in de verkeerskunde. De nieuwe inzichten die het brengt zijn groot, evenals de toepassingen, zowel op theoretisch als toegepast vlak. Met de toelichting in dit artikel hopen we deze fascinerende nieuwe vindingen weer wat dichterbij concrete toepassingen te brengen!

De auteurs

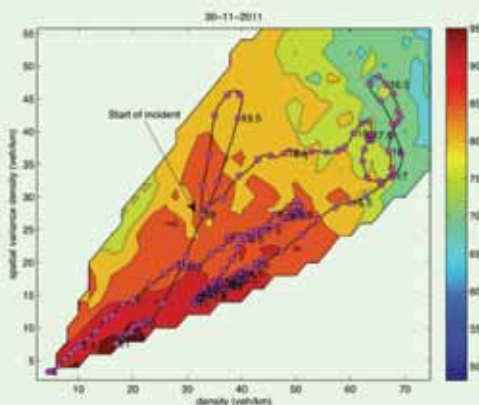
Prof. dr. ir. Serge Hoogendoorn is hoogleraar Verkeersstromen en Dynamisch Verkeersmanagement op de TU Delft.

Dr. Victor L. Knoop is universitair docent aan de TU Delft op het gebied van modelleren van verkeersstromen.

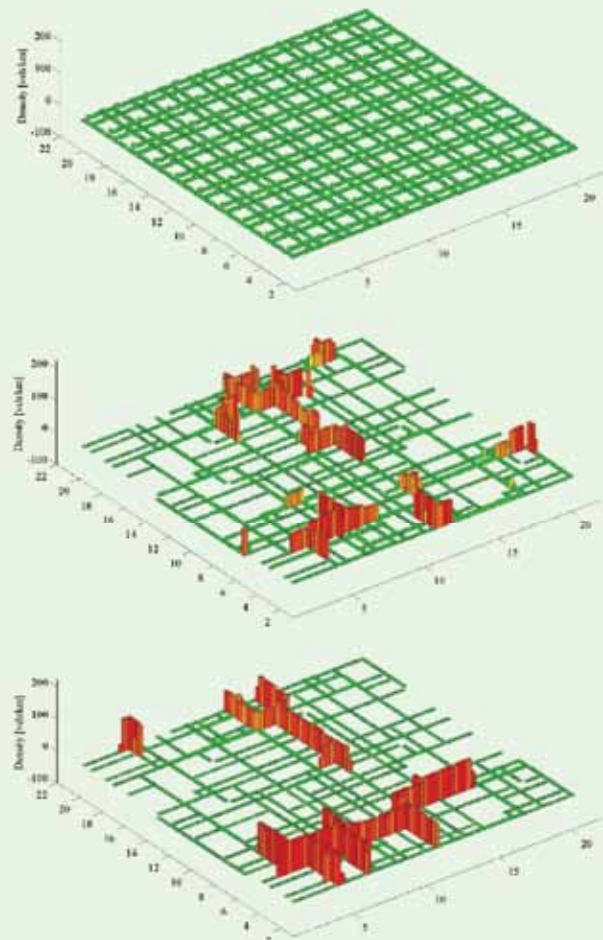
***Zie het artikel Praktijkproef Amsterdam, NM Magazine 2012 #3, pag. 8-14. Deze uitgave is te downloaden vanaf NM-Magazine.nl/download.



Figuur 3
Ontwikkeling van de gemiddelde dichtheid en ruimtelijke spreiding in de dichtheid gedurende een reguliere dag.



Figuur 4
Ontwikkeling van de gemiddelde dichtheid en ruimtelijke spreiding in de dichtheid gedurende in geval van een incident (om 19.00 uur).



Figuur 5
Een gridnetwerk waarin eerst sprake is van een homogene verdeling van het verkeer (bovenste figuur), maar waar na verloop van tijd nucleatie optreedt: het samenklonteren van files.