

Naar een vlottere doorstroming op het wegennet

Ben Immers

Essay ten behoeve van de Raad voor Verkeer en Waterstaat

Prof. Ben Immers
TNO M&L
Postbus 49
2600 AA Delft
Tel.: +31152696811
Email: ben.immers@tno.nl

1. Inleiding

In deze bijdrage wordt vooral onderzocht hoe verkeersmanagement kan bijdragen aan een vlotte doorstroming van het verkeer. Verkeersmanagement is gericht op het realtime regelen (beheersen, bijsturen) van het verkeer op het wegennetwerk. Maatregelen die in het kader van verkeersmanagement worden toegepast richten zich zowel op de vraag naar vervoer als op het aanbod van capaciteit en vervoerdiensten. Het doel dat men wil bereiken kan zowel in generieke als in specifieke termen worden beschreven, zoals:

- beperking van de omvang van de congestie;
- verkeersveilige afwikkeling van het verkeer;
- prioriteit voor het vrachtverkeer op de relatie Rotterdam - Roergebied;
- maximale doorstroming voor verkeer op de relatie Amsterdam-Schiphol;
- verbetering van de betrouwbaarheid van reistijden
- beperking van de uitstoot van schadelijke stoffen (bijv PM10) of beperking van het geluidsniveau
- etc.

Achtereenvolgens zullen in deze bijdrage vier aspecten aan de orde worden gesteld die een cruciale rol spelen bij de (toekomstige) inrichting van verkeersmanagement op het wegennet. Deze aspecten zijn:

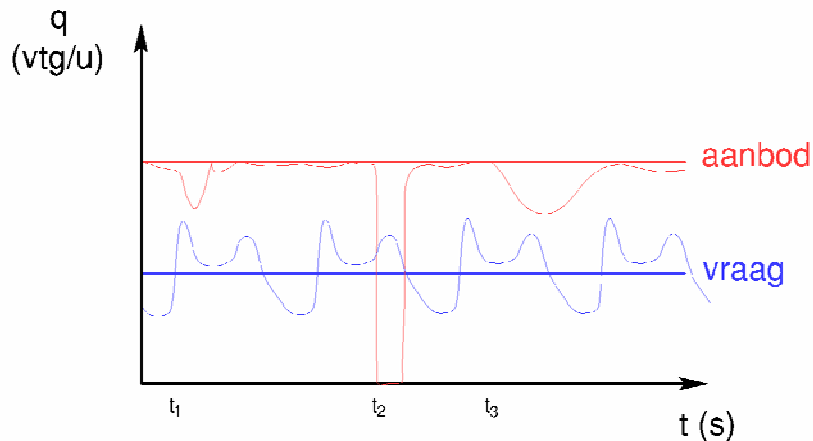
- de meerwaarde van het vermijden van congestie
- wie managet het verkeer
- de urgentie van de verkeerssituatie
- samenhang tussen netwerkstructuur en verkeersmanagement

Vervolgens zal, aan de hand van een schematische uitwerking, worden aangetoond hoe, door het toepassen van een combinatie van maatregelen, de betrouwbaarheid van reistijden (of de doorstroming van het verkeer) kan worden verbeterd.

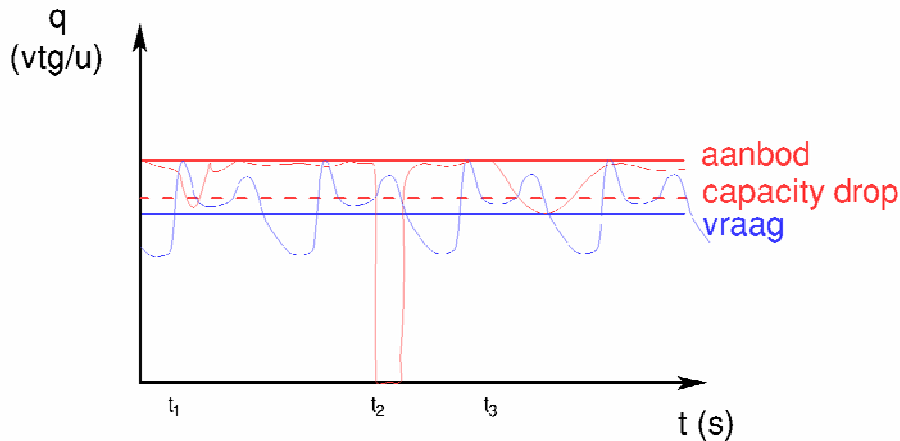
2. De meerwaarde van het vermijden van congestie

In figuur 1 is schematisch het verloop weergegeven van de vraag- en aanbodcurve op een wegvak. De dikke lijnen representeren de gemiddelde waarden van vraag (blauw) en aanbod (rood). In het onderhavige geval ligt de gemiddelde waarde van het aanbod ruim boven de gemiddelde waarde van de vraag. De kans dat congestie optreedt op het wegvak is klein maar, zoals middels de dunnen lijnen is aangegeven, zowel de vraag- als aanbodcurve fluctueren in de tijd. Bijgevolg treedt zo nu en dan toch congestie op, bijvoorbeeld als gevolg van een incident (t_2). Figuur 2 geeft een situatie weer waarbij de gemiddelde waarden van vraag- en aanbodcurve dicht bij elkaar liggen. Op een wegvak waar een dergelijke situatie kan worden waargenomen zal, als gevolg van fluctuaties in vraag en aanbod (t_1 = een ongeval op de andere rijbaan, t_2 = een incident op de rijbaan, t_3 = een regenbui) veel vaker de capaciteit worden overschreden en zal veel vaker sprake zijn van congestie.

Verkeersmanagement maatregelen kunnen ingezet worden om fluctuaties in vraag en aanbod te beperken of zodanig te beïnvloeden dat de vraag minder vaak de capaciteit zal overschrijden. Maatregelen waar men aan kan denken zijn: toeritdosering, verstrekken van tijd- en plaats- en persoonsgebonden informatie aan de reiziger, beprijzen en/of belonen van verplaatsingen naar tijde en plaats, routekeuzeadvies, flexibele rijstrookindeling, snelheidsadvies, etc..



Figuur 1: Verloop vraag- en aanbodcurves op een wegvak

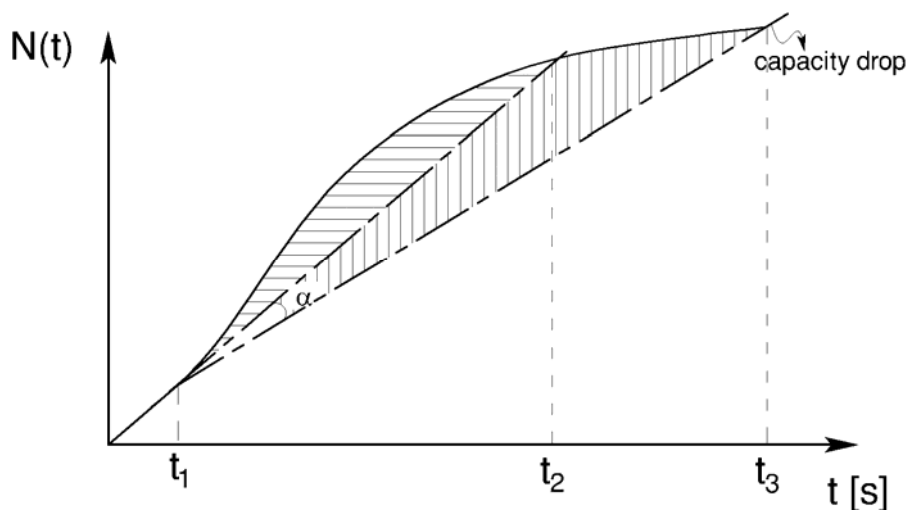


Figuur 2: Verloop vraag- en aanbodcurves op een zwaar belast wegvak

Dat het zinvol is te voorkomen dat de vraag groter wordt dan het aanbod (de capaciteit) is eveneens weergegeven in figuur 2. In de figuur is middels de gestippelde lijn de waarde van de capacity drop weergegeven. Deze lijn geeft het verlies weer aan capaciteit vanaf het moment dat het verkeer stilstaat op een wegvak. De extra terugval in de capaciteit wordt veroorzaakt door hysteresis, een transitie in de verkeersafwikkeling. Om een indicatie te geven van de omvang van dit effect: de capaciteit van een rijstrook van een autosnelweg (stromend verkeer) bedraagt 2200 à 2400 pae per uur. Zodra het verkeer

stilstaat bedraagt de (vertrek)capaciteit van dezelfde rijstrook ongeveer 1800 pae per uur. Het verlies aan capaciteit blijft voortduren zolang er een file staat op de weg. Pas na het oplossen van de file kunnen weer de hoge waarden van de capaciteit worden waargenomen.

In figuur 3 is hetzelfde verschijnsel weergegeven. Op de horizontale as is de tijd en op de verticale as het cumulatieve aantal voertuigen weergegeven. De hoek die de aankomstcurve en vertrekcurve maken met de x-as geeft (afhankelijk van de beschouwde curve) de aankomstintensiteit (vraag) resp. de vertrekintensiteit (aanbod, capaciteit) weer. Op het moment t_1 wordt de vraag groter dan de capaciteit met als gevolg dat een file ontstaat. In de figuur is middels het horizontaal gearceerde gedeelte de omvang van de optredende congestie weergegeven. Afhankelijk van het moment van aankomst, geven lijnen evenwijdig aan de x-as aan hoe lang een voertuig in de file staat en lijnen evenwijdig aan de y-as de lengte van de file.



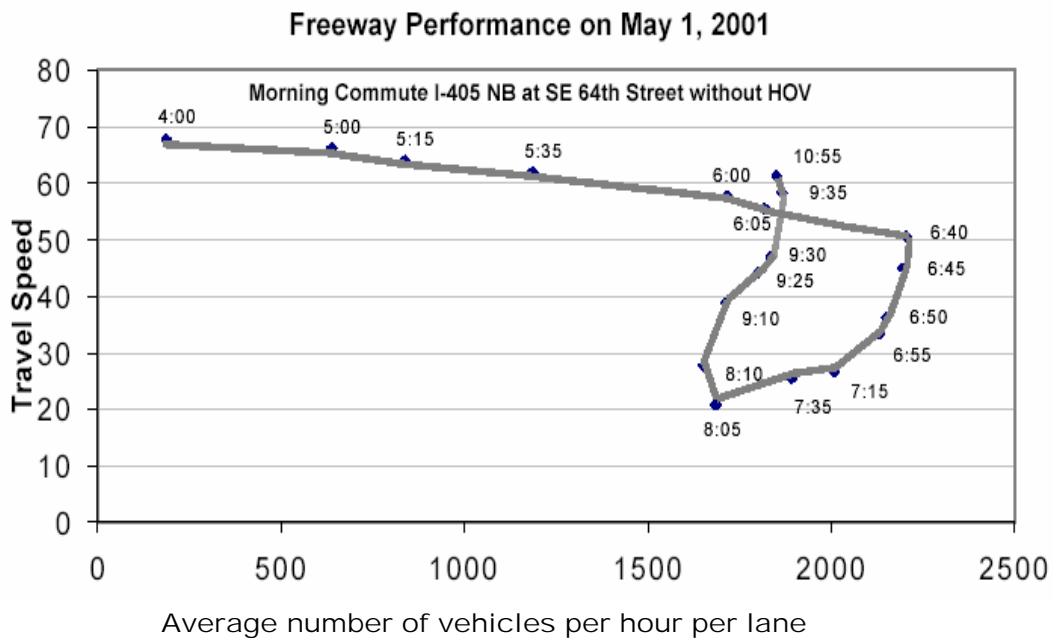
Figuur 3: Omvang van de congestie op een wegvak, zonder en met capacity drop

In de figuur is nog een tweede lijn getrokken (capacity drop). Deze lijn maakt een hoek α met de vertrekintensiteit (capaciteitslijn). Het verticaal gearceerde gedeelte geeft het extra tijdverlies weer dat een gevolg is van de capacity drop. Op het tijdstip t_3 is de file veropgelost en bereikt de capaciteit weer zijn oorspronkelijke waarde.

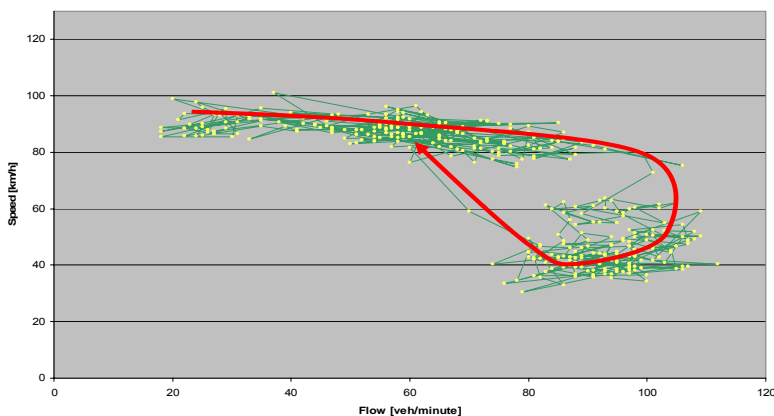
Als de vraag- en aanbodcurve dicht bij elkaar liggen wordt de mogelijkheid van de verkeersstroom om zich te herstellen (hoge capaciteitswaarde) steeds kleiner.

In figuur 4 is een illustratie van het hysteresis verschijnsel weergegeven voor een Amerikaanse freeway (I-405). Deze figuur is zo interessant omdat naast de vorm van de kromme ook aangegeven is op welk tijdstip van de ochtendspits een bepaalde afwikkelingskwaliteit (snelheid) wordt geboden. Omstreeks 06.40 uur gaat het fout en om 9.30 uur begint de verkeersstroom zich te herstellen.

Gelet op de omvang van de capacity drop is het interessant verkeersmanagement maatregelen in te zetten met behulp waarvan het optreden van dit fenomeen kan worden voorkomen (bijv. door toepassing van toeritdosering). Een tweede benadering zou erop gericht kunnen zijn de omvang van de capaciteitsval te verminderen (het verhogen van de vertrekcapaciteit van een file). Vooral nog is hier weinig onderzoek naar gedaan. In figuur 5 is het verschijnsel nogmaals weergegeven maar nu gebaseerd op gegevens van de E17 (Gent – Antwerpen; capaciteit weergegeven in voertuigen per rijbaan, waarbij 1 rijbaan = 3 rijstroken).



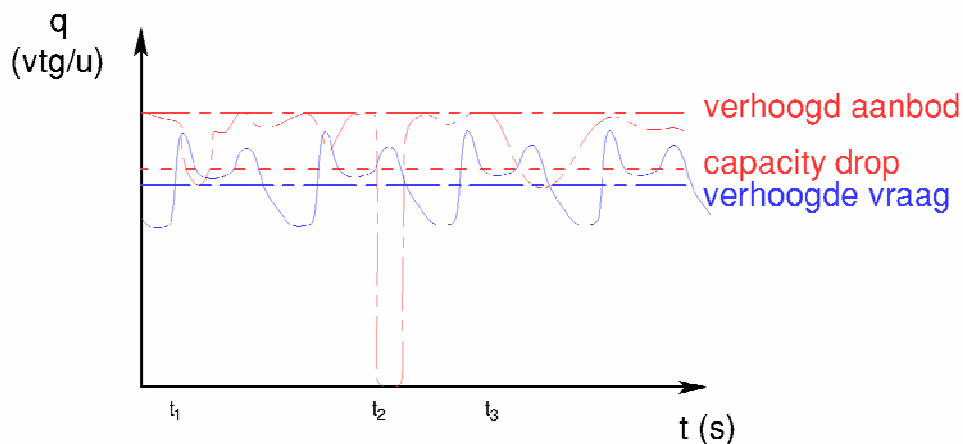
Figuur 4: Illustratie van capacity drop op I-405



Figuur 5: Hysteresis waargenomen op de E17

In figuur 6 is weergegeven welke effecten verwacht mogen worden van de omvangrijke maatregelen gericht op het 'beter benutten' van de capaciteit van het netwerk (bijv. de invoering van de spitsstrook). Kenmerk van de aanpak is dat de beschikbare capaciteit zoveel mogelijk wordt benut. Door de introductie van deze maatregelen wordt de capaciteit tijdelijk verhoogd waardoor ook een grotere vraag kan worden verwerkt. Een nadeel van deze benadering is dat de aanbodfunctie kritischer wordt voor verstoringen. Dit betekent dat kleine verstoringen in de verkeersafwikkeling eerder congestie tot gevolg zullen hebben en dat de gevolgen groter zullen zijn, zowel wat betreft de duur van de verstoring als de omvang van de terugval in capaciteit die een gevolg is van de verstoring.

Dit gegeven kan heel vervelende gevolgen hebben indien vraag- en aanbodfunctie dicht tegen elkaar aanliggen (weinig reservecapaciteit). Het systeem kan dan gekarakteriseerd worden als inherent instabiel (in vergelijkbare productieprocessen opereert men daarom veelal onder de 70% van de theoretische capaciteit).



Figuur 6: Gevolgen van 'beter benutten' capaciteit netwerk

3. Wie managet het verkeer

Bij de toepassing van verkeersmanagement op het wegennet kunnen diverse belanghebbende partijen (actoren, stakeholders) worden onderscheiden:

- het nationale verkeerscentrum
- het regionale of lokale verkeerscentrum
- de publieke dienstverleners (politie, brandweer, ambulance, etc.)
- de particuliere dienstverleners (berger, wegrestaurant, tankstation, etc.)
- de weggebruikers, reizigers (personenauto)
- de vervoerder van goederen
- de omwonenden
- etc.

Welke belangen moeten nu prevaleren bij het nemen van beslissingen over het realtime regelen van het verkeer. Afgezien van de toegekende prioriteiten kunnen in ieder geval drie verschillende optima worden gerealiseerd:

- een systeemoptimum waarbij een afweging wordt gemaakt op het niveau van de samenleving van alle gewogen collectieve kosten en baten
- een netwerkoptimum waarbij de verkeersafwikkeling (vanuit het verkeerscentrum) zodanig wordt beïnvloed dat een generieke doelstelling (bijv. de totale reistijd in het systeem) wordt geoptimaliseerd
- een gebruikersoptimum waarbij elke gebruiker zijn eigen doelstellingsfunctie (bijv. eigen reistijd) optimaliseert.

Daarnaast kunnen uiteenlopende prioriteiten t.a.v. de aard, inrichting en kwaliteit van de verkeersafwikkeling worden gehanteerd die elk weer tot een andere realisatie zullen leiden, zoals:

- hoge prioriteit voor de verkeersveiligheid: “verdubbel uw afstand en halveer uw snelheid”
- hoge prioriteit voor verkeer op de autosnelweg: doseren van het verkeer op de toerit, buffers op het onderliggende wegennet;
- hoge prioriteit voor de leefbaarheid: snelheidsverlaging op autosnelweg (80 km/uur met sectiecontrole),
- hoge prioriteit voor een doelgroep: inrichting doelgroepstrook, beïnvloeding verkeerslichten (openbaar vervoer)
- etc.

Het is belangrijk te beseffen dat het samenspel tussen de verschillende actoren uitmondt in de waargenomen verkeersafwikkeling. Weggebruikers, dienstverleners, verkeerscentrale etc. reageren voortdurend op elkaar. In het kader van Incident Management is dit samenspel samengevat onder de slogan $IM = (CO)_6$: IM is de resultante van een intensief samenspel tussen de hulpverlenende organisaties (de O's) waarbij de C's aangeven wat de samenwerking zoal behelst (Collaboration, Coordination, Communication, Culture, Commitment en Costs).

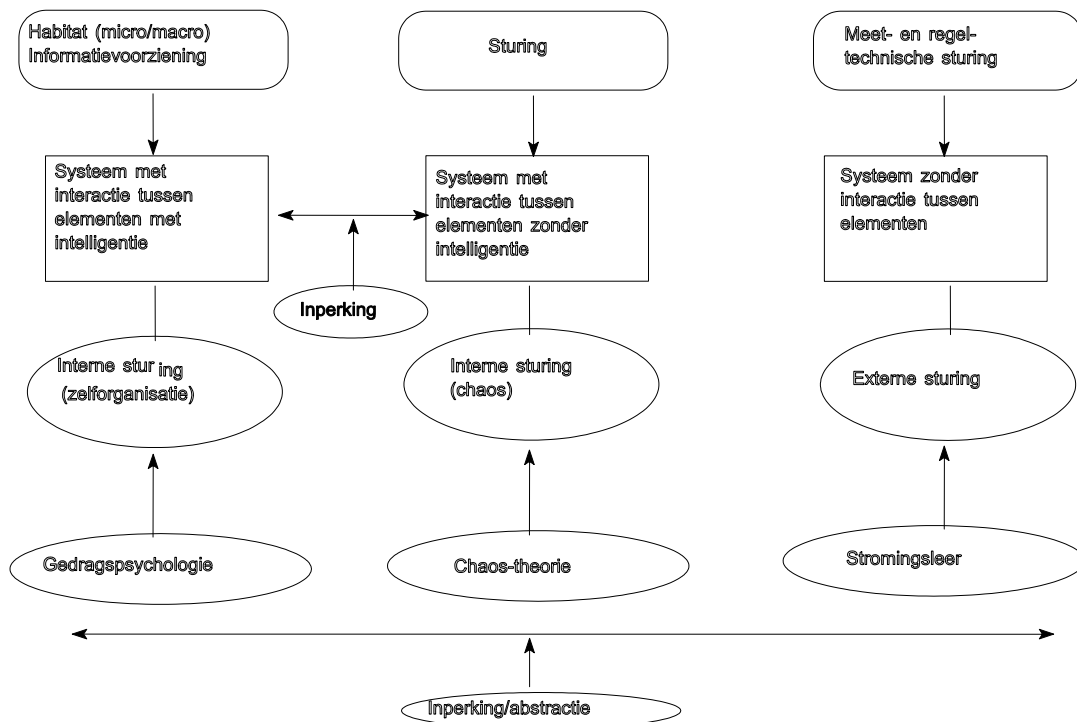
In figuur 7 zijn drie mogelijke beschrijvingen van de verkeersstroom weergegeven. Het verschil tussen de drie onderscheiden regimes kan worden verklaard aan de hand van de aard en omvang van de interacties tussen de componenten (de weggebruikers, etc.) behorende tot het systeem en de intelligentie die in de componenten van het te besturen systeem is opgeslagen.

De afwikkeling van het verkeer op het wegennet (het verkeersafwikkelingsproces) wordt beschouwd als het primaire proces van het verkeerssysteem. Kenmerken van het primaire proces zijn de snelheid van verplaatsing, de kans op incidenten, het rijcomfort, etc.

De individuele verkeersdeelnemers worden beschouwd als de primaire componenten van het verkeerssysteem. Daarnaast zijn ook de wegbeheerder/verkeersregelaars en de hulpdiensten componenten van het verkeerssysteem.

De figuur laat zien dat de bestuurbaarheid van het verkeersproces in belangrijke mate wordt bepaald door de volgende twee karakteristieken:

- de mate van interactie tussen de verschillende systeemcomponenten, en
- de intelligentie van de systeemcomponenten.



Figuur 7. Systematische weergave van de mogelijkheden en principes voor sturing van het verkeerssysteem op de korte termijn

Interacties tussen systeemcomponenten

Interactie houdt in dat de toestand van een systeemcomponent van invloed is op het functioneren van andere systeemcomponenten. Een voorbeeld van een korte termijn interactie is het rijgedrag van reizigers dat voortdurend beïnvloed wordt door keuzes van andere reizigers. Dit geldt bijvoorbeeld voor de rij snelheid en het inhaalgedrag. Een ander voorbeeld is de kijkersfile naar aanleiding van een ongeval. Interacties die plaatsvinden op de iets langere termijn hebben o.a. betrekking op vervoerwijzekeuze, routekeuze en vertrektijdstipkeuze.

Indien de componenten van het te besturen systeem ‘dood’ zijn, d.w.z. niet intelligent en niet zelf kiezend, is het mogelijk het functioneren van het systeem door middel van externe besturing sterk te beïnvloeden (figuur 7, rechter kolom) Men kan daarbij denken aan een lopende band met fabrieksproducten. Dit zal beter lukken naarmate er minder interacties plaatsvinden tussen de elementen/componenten van het systeem en wanneer de optredende interacties eenvoudig te beschrijven zijn en/of slechts een lokaal effect genereren.

Naarmate de interacties¹ tussen de componenten toenemen (figuur 7, middelste kolom) dient het verkeersproces omschreven worden als een complex niet-lineair proces. De myriade van lokale interacties bepaalt het uiteindelijke globale verloop van het proces (het functioneren van het systeem).

Een belangrijk kenmerk van complexe niet-lineaire processen is dat er niet of nauwelijks nog sprake is van een relatie tussen het functioneren van de afzonderlijk systeemcomponenten en het functioneren van het systeem in zijn totaliteit. Vertaald naar het verkeersproces betekent dit dat bestuurders van auto's afzonderlijk, voor hun eigen situatie, optimale beslissingen nemen. Het resultaat hiervan op een hoger abstractieniveau is veelal een suboptimaal functionerend transportsysteem.

Intelligentie van de componenten

Een tweede onderscheid dat bij de beschrijving van het systeem (en de daarin optredende processen) gemaakt dient te worden is de mate waarin de individuele componenten beschikken over een eigen intelligentie. De componenten kunnen in het ene uiterste geval bestaan uit dode materie (figuur 7, middelste en rechter kolom) en in het andere geval uit intelligente wezens (figuur 7, linker kolom).

In het huidige verkeerssysteem is voornamelijk sprake van de laatstgenoemde categorie. Deze karakterisering² van het verkeersafwikkelingsproces als een complex niet-lineair proces

¹ Mogelijke optredende interacties zijn:

- interacties werken alleen op korte afstanden (botsing)
- interacties zijn ‘eenvoudig’ te beschrijven door wetten, geldig voor alle elementen
- er is alleen sprake van ‘paar’ of ‘buur-buur’ wisselwerking, de elementen verder weg doen niet mee; er is geen ‘collectieve’ wisselwerking en geen hysteresis
- de interactie zelf is onafhankelijk van de omgeving of ‘habitat’.

² Het gedrag van verkeersdeelnemers kan als volgt worden gekarakteriseerd:

- beïnvloedbaar (door informatie of door gedrag van anderen),
- (enerzijds) exploratief omdat via opvoeding is bijgebracht dat actief exploreren wordt beloond,
- (anderzijds) satisficing (men neemt vrij snel genoegen met een gemaakte keuze, men blijft niet voortdurend optimaliseren),
- retro-rationaliserend (achteraf kunnen alle acties beredeneerd worden),
- gesteund door ervaring; er is sprake van leereffecten (ervaring, gewoontegedrag),
- een zekere mate van rationaliteit (met grote verschillen tussen verkeersdeelnemers en zelfs per verkeersdeelnemer afhankelijk van tijd, stemming),
- strategisch; men werkt vaak volgens een bepaalde strategie (bij congestie linker rijstrook kiezen); werkt die niet dan kiest men voor een andere strategie,
- conflicten vermijgend; botsingen wil men zoveel mogelijk voorkomen.

waarbij de componenten beschikken over een hoge eigen intelligentie (een beschrijving van het huidige systeem) zal fungeren als vertrekpunt voor de zoektocht naar geschikte sturingsinstrumenten.

Bovenstaande kenmerken impliceren dat de verkeersafwikkeling in een netwerk in belangrijke mate het karakter heeft van een zelfregulerend systeem (een levend systeem).

In tabel 1 zijn zowel de sterke als de zwakke punten van een zelfregulerend systeem weergegeven.

Tabel 1. Karakteristieken van zelfregulerende systemen ('Swarm models'; bron: 'Out of Control - the new biology of machines', Kevin Kelly, 1995)

Sterke punten van zelfregulerende systemen	Zwakke punten van zelfregulerende systemen
Kunnen zich aanpassen aan de omgeving	Zijn niet-optimaal, vanwege de omvangrijke redundantie en het ontbreken van een controlestructuur
Kunnen zich verder ontwikkelen in de tijd	Zijn niet controleerbaar vanwege het ontbreken van autoriteit
Beschikken over herstellend vermogen	Zijn moeilijk tot niet voorspelbaar in hun gedrag
Kunnen nieuwe structuren doen ontstaan	Zijn moeilijk tot niet begrijpbaar, ondermeer vanwege hun vermogen nieuwe structuren te doen ontstaan en nieuwe oplossingen te genereren
Kunnen nieuwe oplossingen genereren voor bestaande of nieuwe problemen	Reageren vertraagd op gebeurtenissen door het ontbreken van een eenduidige controlestructuur

Essentieel voor het functioneren van een levend systeem zijn de twee volgende kwaliteiten:

- de aard en omvang van de communicatie tussen de verschillende systeemcomponenten;
- het vermogen van het systeem (en de systeemcomponenten) om te leren.

Sturingsmogelijkheden

De uitdagende opgave waar we voor gesteld staan met betrekking tot het regelen (managen) van het verkeer in een netwerk is hoe, gegeven het zelfregulerende karakter van het verkeer, de verkeersstroom conform een gewenste kwaliteit (vlotte doorstroming) af te wikkelen.

Op grond van de beschrijving van de verschillende soorten processen (figuur 7) en de karakterisering van het huidige verkeersproces kunnen mogelijkheden voor sturing/beïnvloeding van het verkeersproces worden aangegeven. Essentieel voor het succes van de toepassing van sturingsmaatregelen is dat de personen/groepen waarop de sturing van toepassing is, zich in de voorgestelde maatregelen kunnen vinden (“sturen op welbevinden”). De sturing kan op verschillende wijzen en op verschillende plaatsen in het systeem aangrijpen.

Levend, zelforganiserend systeem

Een eerste mogelijkheid tot sturing die hier wordt besproken is de beïnvloeding van het gedrag van de componenten zonder daarbij de karakteristieken van het proces te veranderen.

Dit laatste houdt in dat er sprake blijft van een zelforganiserend systeem met intelligente componenten. In het artikel “Verkeer en zelforganisatie” (van Koningsbruggen en Immers, 2002) worden drie mogelijke vormen van zelfregulering in de verkeersafwikkeling uitgewerkt:

- het plaatsen van de context voor de gewenste verkeersafwikkeling en het aanpassen van het verkeer aan deze context,
- het inregelen van de context voor de gewenste verkeersafwikkeling,
- het verkeer schept zijn eigen context: het medium als boodschapper van de context.

Voor een verdere uitwerking van deze benadering wordt verwezen naar “Verkeer en Zelforganisatie (van Koningsbruggen en Immers, 2002)].

In deze bijdrage zullen ter illustratie twee elementen van een context worden beschreven:

- de habitat (verkeersomgeving) en wijzigingen daarin
- De informatieverschaffing aan de weggebruikers.

Habitat

De habitat (en wijzigingen daarin) kan op micro en op macro niveau worden beschreven. Op micro niveau kunnen wijzigingen in de habitat leiden tot gedragsverandering. Enige voorbeelden zijn:

- optic flow; strepen die op een wisselende afstand in of buiten het directe gezichtsveld van de bestuurder worden aangebracht met het oogmerk vermindering van de snelheid;
- beïnvloeding overige zintuigen door geluid (muziek, wordt elders al veel toegepast), reuk, tast (trillingen). Toepassing in het voertuig kan bijzonder effectief zijn, zeker indien men (op een systematische wijze) combinaties van beelden, geluid en trillingen toepast.

Mogelijkheden om op macro niveau de habitat te wijzigen zijn:

- dimensionering van de infrastructuur (bijv. toepassing van zelfverklarende wegen);

- landschappelijk inpassing, wijziging 'rijcultuur', wijziging omgangsvormen in het verkeer.

Informatieverschaffing

Sturing van het verkeerssysteem door informatieverschaffing luistert erg nauw. Het is vooral interessant en kansrijk om de informatieverschaffing toe te spitsen op de dynamische aspecten van het verkeer (tijd, plaats en profiel van de reiziger). Indien men bovendien in staat is de eenzijdige oriëntatie van de informatieverschaffing te doorbreken (in plaats van verkeerscentrum naar reiziger ook van reiziger naar verkeerscentrum en van reiziger naar reiziger), ondersteunt de informatieverschaffing een belangrijke mate het proces waarin het systeem (en de systeemcomponenten) de vaardigheid opbouwt om te leren.

Elementen die bij de invulling van de informatieverschaffing uitgewerkt dienen te worden zijn:

- betrouwbaarheid van de informatie
- actualiteit van de informatie
- volledigheid van de informatie
- response rate van de reiziger

Belangrijk is dat informatie correct is en dat de informatie begrepen wordt. Bovendien moet men voorzichtig zijn met een overdaad aan informatie; de bestuurder (en de exploitant/beheerder) moeten in de gelegenheid gesteld worden de voor hen relevante informatie tot zich te nemen; niet relevante informatie dient hen zoveel mogelijk onthouden te worden. Aanbevolen wordt vooral die informatie te verschaffen die de reiziger nu al gebruikt. Toepassing van de bovengenoemde maatregelen vereist inzicht in psychologie van de individuele bestuurder/reiziger en inzicht in het gedrag van.

Beperking van de intelligentie van de primaire componenten

Wil men niet volledig vasthouden aan de karakteristieken van het bestaande systeem (zelforganiserend, levend systeem; linker kolom figuur 7) dan komen ook andere vormen van sturing in aanmerking. Een van de mogelijkheden die zich dan aandient is de beperking van de intelligentie van de primaire componenten (verkeersdeelnemer). De mate waarin de intelligentie wordt weggenomen kan variëren (allerlei vormen van 'advanced driver assistance' variërend van 'adaptive cruise control' tot 'autonomous driving'). In het laatste geval is er slechts sprake van een beperkte eigen intelligentie van de primaire component; de systeembeheerder heeft alle belangrijke rijtaken overgenomen. Secundaire taken/intelligentie zoals monitoring kunnen gehandhaafd blijven.

Indien er, ondanks de beperking van de intelligentie van de componenten, toch veelvuldig interacties optreden tussen de componenten onderling blijft het systeem zich gedragen als een complex, niet-lineair systeem (figuur 7, middelste kolom). Wel zal het in toenemende mate mogelijk zijn sturing toe te passen op het systeem door toepassing van globale

sturing- en regelprincipes uit de meet- en regeltechniek. Immers door de intelligentie van de componenten in het systeem weg te nemen wordt het mogelijk de reactie van een component op een gebeurtenis beheersbaar te maken. De afloop van het proces blijft echter onvoorspelbaar door de onvoorspelbaarheid van de optredende interacties en hun effect op het totale proces. In principe zijn de wetten uit de chaostheorie op deze processen van toepassing.

Door de reacties van componenten op gebeurtenissen volledig te beheersen en tevens het proces zodanig te structureren dat activiteiten in een zekere vaste sequentie optreden, wordt een zodanig systeem (procesafwikkeling) gecreëerd dat principes uit de meet- en regeltechniek wel van toepassing zijn (figuur 7, rechter kolom).

Kijken op een ander abstractieniveau

Bij de behandeling van het verkeerssysteem is een abstractieniveau gehanteerd waarbij elke individuele component (elk met een eigen intelligentie) als een afzonderlijke entiteit wordt beschouwd. Wordt het verkeerssysteem vanuit een hoger abstractieniveau beschouwd dan gedragen alle componenten zich op identieke (gemiddelde) wijze, waarbij ook de interacties tussen de componenten onderdeel vormen van dit gemiddelde gedrag. Deze beschouwingwijze wordt hier toegepast omdat daardoor de mogelijkheid wordt gecreëerd andere, aanvullende sturing- en regelinstrumenten te vinden voor het verkeerssysteem op een hoger abstractieniveau. Op het hogere abstractieniveau kan het verkeerssysteem beter vergeleken kunnen worden met standaard productie- en bedrijfsprocessen waarop principes uit de meet- en regeltechniek worden toegepast.

Voor het traceren van deze principes is het wel noodzakelijk hetzelfde abstractieniveau te hanteren. Regelprincipes die op een hoog abstractieniveau in productie- en bedrijfsprocessen worden toegepast zijn 'spiegelen' ofwel het inrichten van een back-up systeem, het aanbrengen van buffers in de procesgang, het hanteren van order acceptatie procedures, hiërarchische productieplanning etc. Al deze principes kunnen/worden ook in het verkeerssysteem worden toegepast (buffers, doseren, doelgroepstroken, etc.). Het effect van toepassing van deze principes zal groter zijn (resp. men zal beter in staat zijn te beoordelen waar toepassing van deze principes effect sorteert) naarmate het gemiddelde gedrag van een component in overeenstemming is met het individuele gedrag.

4. De urgentie van de verkeerssituatie

De meerwaarde van verkeersmanagement ligt voor een belangrijk deel in de mogelijkheid die verkeersmanagement maatregelen bieden om kritieke situaties op het wegennet (incidenten, slechte weersomstandigheden, etc.) sneller en/of effectiever op te lossen. Om een effectieve toepassing van DVM maatregelen te faciliteren is het wellicht noodzakelijk de aard van het regime dat van toepassing is op de afwikkeling van de verkeersstroom in bepaalde (kritieke) situaties te wijzigen. Ter plekke van een incident zou een strikte vorm van 'command en control' van toepassing kunnen zijn (nu moet

iedereen even precies doen wat door het COPI (COördinatieteam Plaats Incident) is beslist). Deze aanpak kan, met het oog op de gewenste snelheid waarmee een probleem opgelost dient te worden, de voorkeur genieten boven een aanpak waarbij het probleem vanuit zelforganiserende principes wordt opgelost. Een mogelijk nadeel van deze rigide aanpak is dat daarmee voorbijgegaan wordt aan een van de belangrijke kenmerken van zelforganiserende systemen en dat is dat deze systemen in staat zijn zelf in kritieke situaties nieuwe innovatieve oplossingen te creëren. De moeilijkheid is dat er geen garantie gegeven kan worden dat een nieuwe oplossing snel gevonden wordt. Het is daarom aan te bevelen de chaotische benadering vooral in experimenten aan bod te laten komen.

Tot slot moet vermeld worden dat naast de curatieve ook een preventieve benadering van verkeersmanagement mogelijk is. Het belang van deze benadering is al aangegeven in paragraaf 2: de meerwaarde van het vermijden van congestie. Ook in de volgende paragraaf komt de preventieve benadering aan bod.

5. De structuur van het netwerk

In principe zal een systeem in staat zijn de beoogde functie(s) te blijven vervullen indien vraag en aanbod goed op elkaar zijn (blijven) afgestemd (in dit geval: $\text{vraag} \leq \text{capaciteit van de weg}$). Uitgaande van deze voorwaarde kan de robuustheid van het transportsysteem door het nemen van een aantal maatregelen worden beïnvloed. Die maatregelen behelzen het aanbrengen van een zekere *redundantie* of reservecapaciteit in het systeem en het aanbrengen van een mate van *compartimentering* in het systeem om te verhinderen dat een lokale verstoring zich over het gehele systeem verspreidt. Daarnaast spelen ook *veerkracht en aanpassingsvermogen* mee bij de beoordeling van de robuustheid van een systeem.

Redundantie

De robuustheid van een systeem kan worden vergroot door een zekere reservecapaciteit in het systeem aan te brengen. Deze reservecapaciteit wordt veelal aangeduid met de term *redundantie*. In principe kunnen twee typen *redundantie* worden onderscheiden: *actieve* en *passieve* *redundantie*. Bij *actieve* *redundantie* werken hoofdsysteem en reservesysteem samen onder normale gebruiksomstandigheden, maar, in geval van uitval van een van beide systemen, kan het andere systeem zelfstandig de volledige taak uitvoeren (bijv. uitval van een van beide vliegtuigmotoren). *Passieve* *redundantie* houdt in dat het reservesysteem pas in werking treedt indien het hoofdsysteem uitvalt (bijv. een noodaggregaat in het ziekenhuis). In het transportsysteem kan de reservecapaciteit op verschillende niveaus en op verschillende manieren worden ingebouwd.

De volgende niveaus kunnen worden onderscheiden:

- Op strategisch niveau: afstemming tussen activiteitenpatroon en netwerkstructuur. Op dit niveau is het voor de robuustheid van het transportsysteem van belang dat vermeden wordt dat men (gedurende een kortere periode) met sterk geconcentreerde

verkeersstromen wordt geconfronteerd. Dit fenomeen wordt veelal veroorzaakt door de inplanting van omvangrijke monofunctionele activiteiten. Een voorbeeld is de strakke scheiding van woon- en werkgebieden waardoor omvangrijke pendelstromen worden opgeroepen.

- Op tactisch niveau: multimodale verknoping van netwerken en de inrichting van multimodale vervoerdiensten waardoor netwerkonderdelen en vervoerwijzen als terugvaloptie van elkaar kunnen fungeren
- Op operationeel niveau: afstemming vraag en aanbod op het verkeersnetwerk; reservecapaciteit in het netwerk, flexibilisering van de beschikbare capaciteit middels ITS en DVM-maatregelen, zelflerende eigenschappen, zelforganisatie.

Gebrek aan redundantie in een systeem kan catastrofale gevolgen hebben. De afgelopen jaren hebben wij dit o.a. kunnen waarnemen bij de distributie van elektriciteit (New York, Engeland, Italië). In Nederland heeft het gebrek aan redundantie ertoe geleid dat de betrouwbaarheid van de dienstverlening op het spoorwegnet fors aan kwaliteit heeft ingeboet (Nederlandse Spoorwegen et al, 2003).

Ook op het wegennet kan een gebrek aan redundantie grote gevolgen hebben voor de kwaliteit van de verkeersafwikkeling. Deze gevolgen zullen omvangrijk zijn indien we worden geconfronteerd met ernstige crisissituaties waarbij een snelle evacuatie van de bevolking gewenst is. Op kleinere schaal speelt het probleem echter ook bij incidenten met als gevolg omvangrijke congestie op het wegennet maar ook slechte bereikbaarheid van de incidentlocatie voor de hulpdiensten. Incidenteel voorkomende situaties als wegwerkzaamheden, extreme weersomstandigheden en grootschalige evenementen vragen ook om een zekere redundantie in capaciteit. Tot slot kan een gebrek aan redundantie oorzaak zijn van het sneller optreden van blocking back effecten en een capacity drop.

Compartimentering

De zwakste schakel bepaalt de sterkte van de keten. Deze wetmatigheid geldt in zekere zin ook voor de robuustheid van een netwerk: de schakel of het knooppunt met de geringste reservecapaciteit zal veelal het eerst problemen veroorzaken. Hier moeten wel enige kanttekeningen bij worden geplaatst:

- de ligging van de schakel of het knooppunt speelt een grote rol, en ook
- de omvang van de schommelingen in vraag en aanbod.

De ligging van een schakel of knooppunt heeft invloed in de zin dat in bepaalde gevallen de congestie en de onbetrouwbaarheid die daar een gevolg van zijn, beperkt blijven tot de betreffende schakel of een klein deel van het netwerk. In andere gevallen kan congestie op een centraal gelegen, unieke schakel of een knooppunt middels olievlekwerking tot gevolg hebben dat de verkeersafwikkeling op grote delen van het netwerk verstoord wordt. De olievlekwerking wordt ook bevorderd door de aanwezigheid van allerlei interacties tussen systeemonderdelen. Bij de spoorwegen, waar momenteel allerlei diensten zoals ritten van treinen en treinonderdelen, met elkaar verknoopt zijn is dit een groot probleem. Ook op de weg speelt dit steeds meer.

Voor compartimentering is het goed om:

- de capaciteit van zowel knooppunten als schakels uit te breiden;
- meerdere stelsels (bijvoorbeeld hoofdwegennet en onderliggend wegennet) operationeel te houden/maken en deze stelsels goed te verknopen;
- een capaciteitsdaling te voorkomen en de daling van de capaciteit snel te verhelpen als deze toch optreedt;
- de vraag te beïnvloeden. Dat wil zeggen dat er mogelijkheden daartoe in het netwerk ingebouwd moeten worden, zoals buffers en doseersystemen.

Mogelijke indicatoren om de mate van compartimentering te bepalen zijn:

- De knoopafstand: hoe meer knooppunten en op- en afritten er zijn (hoe kleiner de knooppuntafstand), hoe beter de verschillende stelsels met elkaar verknoot zijn. Dit betekent dat meer (alternatieve) routes voor de afwikkeling van een verplaatsing beschikbaar zijn. Tegelijkertijd zullen er sneller ‘blocking back’ effecten optreden als de knopen dicht bij elkaar liggen. Wat de optimale afstand tussen knooppunten en op- en afritten is, hangt af van aard en omvang van de verkeersvraag.
- Samenhang van verschillende stelsels (bijv. HWN en OWN). Als stelsels onafhankelijk van elkaar moeten kunnen functioneren, moeten ze wel samenhang vertonen. Er zijn verschillende connectiviteitsmaten waarmee de mate van samenhang in een netwerk van een stelsel bepaald kan worden. In (Sanders, 1998) worden bijvoorbeeld de lijnstuk-gewogen, knooppunt-gewogen en dubbel-gewogen connectiviteit genoemd. In (Hilbers et al, 1997) worden ook het percentage snelweg met parallelweg en percentage hoofdwegen parallel aan autosnelwegen genoemd. Hierin worden ook nog enkele andere indicatoren genoemd (zoals de netdichtheid), die relevant kunnen zijn.
- De kwetsbaarheid van knooppunten. Bijvoorbeeld het aantal armen per knooppunt en de capaciteit per richting, en de afstand tot andere knooppunten.

Veerkracht en aanpassingsvermogen

Organische, biologische systemen kenmerken zich door een hoge graad van robuustheid. Zij realiseren die robuustheid voornamelijk door de aanwezigheid van een hoge mate van redundantie en spreiding van functies. Daarnaast blijken organische systemen bestand te zijn tegen ongunstige omgevingscondities omdat zij beschikken over het vermogen zich snel te herstellen van een tijdelijke overbelasting en omdat zij in staat zijn zich geleidelijk aan te passen aan veranderende omstandigheden over de langere termijn.

Het is interessant deze noties toe te passen op het transportsysteem omdat het transportsysteem zelf kenmerken vertoont van een levend, zelforganiserend systeem (Immers en van Koningsbruggen, 2001).

Veerkracht is het vermogen van het transportsysteem om zich, telkens weer en bij voorkeur zo snel mogelijk, te herstellen van een tijdelijke overbelasting. De veerkracht van het transportsysteem is ten eerste gebaat bij:

- de beschikbaarheid van terugvalopties. Onder terugvalopties verstaan we alternatieve routes en alternatieve vervoerwijzen.

- de professionaliteit van de respons (goed op elkaar ingespeelde hulpverlenende instanties; samenwerking, coördinatie en communicatie).
- snelheid van de respons (snelle en adequate maatregelen).

Aanpassingsvermogen. De robuustheid van het transportsysteem kan mede afgemeten worden naar de mate waarin het systeem in staat is meer en andere functies te vervullen dan de functies waarvoor het systeem oorspronkelijk ontworpen werd. Of, anders gezegd, aanpassingsvermogen is de eigenschap die het systeem in staat stelt mee te groeien met de nieuwe eisen die aan het systeem gesteld worden (een voorbeeld is het gebruik van het bestaande autosnelwegennet voor road trains of double-stack containers). Het aanpassingsvermogen kan op 3 termijnen gedefinieerd worden:

- Korte termijn: flexibele inrichting netwerk (dynamische rijstrook markering), dynamische beïnvloeding vraag (informatie).
- Middellange termijn: structuur en inrichting netwerk (terugvalopties); vraagbeïnvloeding door bijv. belonen en bestraffen.
- Lange termijn: betere (flexibele) afstemming infrastructuur en RO.

Momenteel heeft het aanbod van capaciteit in het transportnetwerk een overwegend statisch karakter; zowel de netwerkstructuur als de capaciteiten van de schakels en knooppunten liggen nagenoeg vast. Toeritdosering en de in aanleg zijnde spitsstroken zorgen voor de eerste dynamische elementen. De robuustheid van het transportsysteem kan nog worden vergroot indien het aanbod van capaciteit dynamisch afgestemd kan worden op de vraag. Dit vraagt o.a. om mogelijkheden voor een flexibele inzet van de capaciteit. Vergroting van de flexibiliteit in de toewijzing van de capaciteit kan worden gerealiseerd door:

- stelselmatige opbouw van het netwerk; samenhang in stelsel en onderlinge verknoping stelsels
- netwerkbrede uitwerking alternatieve routes (capaciteit terugvaloptie, omwegfactor, layout en dimensioneren knooppunten)
- verkeersmanagement ter ondersteuning van flexibele aanwending capaciteit netwerk.

6. Conclusies

In deze bijdrage wordt een aantal kenmerken van verkeer gepresenteerd die een directe relatie hebben met de maatregelen die ingezet kunnen worden om de verkeersstroom te beheersen. Daarbij dient opgemerkt te worden dat de opsomming van kenmerken niet uitputtend is. Toch kunnen op basis van de beschreven kenmerken enige belangrijke lessen worden getrokken ten aanzien van de organisatie en invulling van verkeersmanagement op het netwerk, zoals:

- In het afwegingsproces rond toe te passen verkeersmanagement maatregelen dient rekening te worden gehouden met veel uiteenlopende belangen. De vraag is of deze afweging door één organisatie gemaakt kan/moet worden. Daarnaast dient men zich af te vragen in welke mate de voorgestelde maatregelen opgevolgd zullen worden.

- De effectiviteit van de inzet van verkeersmanagement kan worden vergroot door de focus te richten op het voorkomen en neutraliseren van verstoringen (voorkomen van capacity drop); de mogelijkheden om een dergelijke benadering toe te passen worden aanzienlijk groter indien de structuur en vormgeving van het netwerk beter afgestemd zijn op de wisselende gebruiksomstandigheden.
- Vanwege de vele interacties tussen de verschillende systeemcomponenten dient het verkeers- en vervoerssysteem beschouwd te worden als een zelforganiserend (levend) systeem. Het functioneren van het transportsysteem als zelfregulerend systeem (en verkeersmanagement als onderdeel daarvan) kan verbeterd worden door de lerende capaciteit van het systeem te vergroten. Communicatie tussen de betrokken partijen speelt daarin een cruciale rol. Deze communicatie dient niet beperkt te blijven tot het elkaar informeren maar vooral ook door situaties te evalueren en door de feedback een duidelijke plaats te geven in het proces. De mogelijkheden voor verkeersbeheersing zullen mee moeten groeien met ontwikkelingen in het transportsysteem en met ontwikkelingen in de samenleving (programma van eisen en wensen, prioriteitstelling).
- Verkeersmanagement en zelforganisatie staan soms op gespannen voet met elkaar, bijvoorbeeld indien snel een oplossing voor een probleem moet worden gevonden. In de praktijk betekent dit dat afhankelijk van de aard van de situatie andere verkeersmanagementprincipes van toepassing zijn. Voorgesteld wordt in de vorm van experimenten het innovatieve vermogen van een zelforganiserend systeem in kritieke situaties (bijvoorbeeld grote tijdsdruk) te onderzoeken. De opgebouwde kennis kan een grote rol spelen in situaties van transitie (trendbreuk).
- De garantie op een vlotte doorstroming hangt in belangrijke mate af van de robuustheid van het systeem. Onder robuustheid verstaan we het vermogen van een systeem om de functie waarvoor het ontworpen is te blijven vervullen, ook in situaties die sterk afwijken van de reguliere gebruiksomstandigheden. De robuustheid van een transportsysteem kan door het nemen van een aantal maatregelen worden beïnvloed. Die maatregelen behelzen het aanbrenge van een zekere *redundantie* of reservecapaciteit in het systeem en het aanbrenge van een mate van *compartimentering* in het systeem om te verhinderen dat een lokale verstoring zich over het gehele systeem verspreidt. Daarnaast spelen ook *veerkracht en aanpassingsvermogen* een belangrijke rol. Een kansrijke toepassing van deze maatregelen vraagt om een innige samenwerking tussen Dynamisch Verkeersmanagement (DVM) en Ontwerp, Onderhoud en Beheer van transportnetwerken.

Referenties:

Hilbers, H.D., I.R. Wilmink, H.P. Krolis (1997), *Infrastructuur en Mobiliteit in de Randstad, het Ruhrgebied en de regio Antwerpen-Brussel-Gent*. Delft, TNO Inro, Inro/VVG 1997-12, december 1997.

Immers, L.H. en M. Westerman (1995). "Analogieën met verkeer en vervoer met nadruk op dynamisch verkeersmanagement". TNO Inro. december 1996, 95/NV/183, 95/NV/297, 95/NV/311 en 95/NV/310

Immers, L.H. en E.A. Berghout (2000). "Autopoiese en beleidsontwikkeling in het verkeers- en vervoersysteem". TNO Inro in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Rijkswaterstaat AVV. TNO-rapport Inro-VK/2000-05. Delft, december 2000

Immers, L.H. and P. van Koningsbruggen (2001). "Self-organisation in traffic and transport". Paper presented at the first European Conference on Chaos and Complexity in Organisations. Lage Vuursche, The Netherlands, October 2001.

Kelly, Kevin (1994) "Out of Control - the new biology of machines". Addison-Wesley, Reading, MA.

Koningsbruggen, P. van, en L.H. Immers (2002): "Verkeer en Zelforganisatie". In: *Verdieping van Chaosdenken: Theorie en Praktijk*. Redactie: Frans van Eijnatten, Marian Kuijs & Julien Hafmans. Koninklijke Van Gorcum, Assen, 2002; ISBN 90 232 3860 5

Nederlandse Spoorwegen, Prorail, Railned en Ministerie van verkeer en Waterstaat (2003). *Benutten en Bouwen: het plan van de spoorsector*. Utrecht, augustus 2003

Sanders, F.M. (1998), *Ruimtelijke inrichting*. Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Infrastructuurplanning, oktober 1998.

Transportation Research Board (2004). 'Addressing Fiscal Constraints and Congestion Issues in State Transportation Planning'. Transportation Research Circular, Number E-C062, February 2004