

Analogieën met verkeersmanagement

Ben Immers
TrafficQuest
Ben Immers Advies
ben.immers@gmail.com

Henk Taale
TrafficQuest
Rijkswaterstaat
TU Delft
henk.taale@rws.nl

Isabel Wilmink
TrafficQuest
TNO
isabel.wilmink@tno.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
21 en 22 november 2013, Rotterdam**

Samenvatting

Analogieën met verkeersmanagement

Het is van belang om het verkeersmanagementproces zo goed mogelijk te doorgronden en op basis van het begrip van dit proces sturingsprincipes te traceren en uit te werken die toegepast kunnen worden bij het (beter) managen van verkeer in een (wegen)netwerk. Eén van de manieren om een beter inzicht te krijgen in het verkeersmanagementproces is het vergelijken van het verkeersmanagement domein met andere domeinen waarin zich vergelijkbare processen afspelen.

Deze bijdrage beschrijft de vergelijking van het domein verkeersmanagement met vergelijkbare processen in de domeinen biologie (zwermen), logistiek, neurologie (hersenen), communicatienetwerken, elektriciteitsvoorziening, betalingsproces, watermanagement en infrastructurele systemen. Deskundigen uit de hierboven vermelde domeinen zijn uitgenodigd deel te nemen aan een workshop waarin op een gestructureerde wijze gezocht is naar mogelijke analogieën.

Nu zijn er veel aspecten binnen de toepassing van verkeersmanagement die zich lenen voor een vergelijking met andere systemen. Aangezien het onmogelijk is al deze aspecten in de workshop met de gewenste diepgang te behandelen, is besloten de vergelijking te beperken tot een drietal aspecten:

- Zelforganisatie versus sturing. Organiseert het systeem (proces) zichzelf en hoe gebeurt dat? of wordt bewust sturing van buitenaf opgelegd? Indien beide sturingsprincipes voorkomen: wanneer en hoe grijpt men in?
- In hoeverre is er sprake van een gelaagdheid van het systeem en hoe wordt daarmee omgegaan in de regeling (bij voorbeeld door coördinatie tussen de lagen)?
- Op welke wijze worden de robuustheid (systeem kan tegen een stootje) en de betrouwbaarheid (marges in prestatie-indicatoren zijn klein) van het systeem verzekerd? Welke afwijkende situaties treden op in het functioneren van het systeem en hoe is het systeem daarop berekend?

De resultaten van de verschillende vergelijkingen tonen aan dat vanuit elk vakgebied interessante vergelijkingen te maken zijn, zeker voor wat betreft de drie gekozen invalshoeken: de toegepaste sturingsprincipes, de gelaagdheid van het systeem en de robuustheid van het systeem. De gevonden analogieën zijn gebruikt om een eerste 'doorvertaling' te maken (soms beperkt, soms uitgebreid) naar het verkeersmanagementsysteem.

Trefwoorden

Verkeersmanagement, analogieën

1. Inleiding

Het is van belang om het verkeersmanagementproces zo goed mogelijk te doorgronden en op basis van het begrip van het proces sturingsprincipes te traceren en uit te werken die toegepast kunnen worden bij het beter managen van verkeer in een (wegen)netwerk. Eén van de manieren om meer inzicht in de processen te krijgen is een vergelijking met andere domeinen waarin zich soortgelijke processen afspelen. Om dat te doen heeft TrafficQuest een workshop "Analogieën voor Verkeersmanagement" georganiseerd op 16 november 2012.

In deze workshop zijn inleiders uit verschillende vakgebieden op zoek geweest naar analogieën met het verkeersmanagementproces. Deze vakgebieden waren biologie (zwermen), logistiek, hersenen, communicatienetwerken, elektriciteitsvoorziening, betalingsproces, watermanagement en infrastructurele systemen. De gevonden analogieën zijn vervolgens gebruikt om:

- Processen te analyseren en onderling te vergelijken;
- Mogelijkheden om processen aan te sturen te inventariseren en te beoordelen;
- Op basis daarvan het inzicht in het verkeersmanagementproces te vergroten.

Door het onderling vergelijken van de wijze waarop systemen functioneren en ook door te kijken en te vergelijken hoe het functioneren van deze systemen extern en intern wordt beïnvloed, kunnen interessante parallellen worden getrokken.

In de workshop stond verkeersmanagement (of ook wel netwerkmanagement of DVM genoemd) centraal (het focussysteem). Onder verkeersmanagement verstaan we het - op basis van actuele, plaats specifieke en voorspelde verkeers- en omgevingsomstandigheden - doelbewust beïnvloeden (informerend, geleiden, sturen) van de kwaliteit van de verkeersafwikkeling in een netwerk door de toepassing van operationele maatregelen zoals verstrekken van informatie, regelen van het verkeer, beïnvloeden keuzegedrag reiziger, toepassen van tijd- en plaatsgebonden beprijzen, etc. Verkeersmanagement is gericht op het beïnvloeden van zowel het vraagpatroon (verplaatsingen per vervoerwijze) als het aanbodpatroon (infrastructuur en daarop aangeboden diensten). Bij de keuze van de maatregelen wordt gebruik gemaakt van gegevens over de actuele en voorspelde verkeerssituatie. Een belangrijke reden om verkeersmanagement toe te passen is de mogelijkheid die daardoor geboden wordt om de beschikbare en soms schaarse capaciteit in het netwerk op een efficiënte wijze in te zetten voor de afwikkeling van het verkeer. Een andere reden voor de toepassing van verkeersmanagement kan zijn dat men de uitstoot van schadelijke stoffen wil beperken of de omvang van de ongevalrisico's die de verkeersdeelnemers lopen bij de deelname aan het verkeer wil verminderen (TrafficQuest, 2012).

Bij verkeersmanagement zijn het dus de voertuigen en meer in het bijzonder de bestuurders van die voertuigen die via een reeks van maatregelen geïnformeerd, geadviseerd en gestuurd worden. In andere systemen is vaak ook sprake van stromen die (extern en intern) beïnvloed worden. De wijze waarop deze stromen worden afgewikkeld kan interessante ideeën opleveren voor het management van verkeer en omgekeerd. Kortom, analogieën met andere disciplines kunnen helpen om problemen in het eigen vakgebied beter te duiden en processen beter te begrijpen en aan te sturen.

Het vergelijken van verschillende systemen met overeenkomstige kenmerken om hiermee nieuwe kennis op te doen is overigens niet nieuw. Al in 1870 concludeerde James Maxwell dat "The processes of and the deductions applied in the various branches of science are so similar that familiarity with any branch of science may be highly helpful in the study of another branch." (Maxwell, 1927). Toch vormen analogieën nog steeds een onderdeel van de wetenschap waarvan de toepasbaarheid en de potentie niet worden gewaardeerd door veel wetenschappers en technici (Miklovic, 1993). Nu is van geen enkel bestaand verschijnsel (systeem, object, etc.) een ander verschijnsel te vinden zodanig dat beide verschijnselen volledig gelijk zijn aan elkaar. Het is zelfs zo, dat geen enkel verschijnsel identiek is aan zichzelf wanneer het wordt beschouwd op twee verschillende tijdstippen. Bij analogieën dient dan ook niet gezocht te worden naar systemen die in elk kenmerk analoog zijn met een bepaald focussysteem. Dergelijke analogieën bestaan per definitie niet. Het is wel zinvol om te zoeken naar analogiesystemen die op een aantal aspecten overeenstemmingen vertonen met het focussysteem, of die volledig aan elkaar gelijk zijn, gegeven bepaalde vereenvoudigingen, beschouwingswijzen of abstracties die men toepast. Het hanteren van analogieën voor het vinden van oplossingen voor een bepaald probleem berust dus op het nemen van afstand tot de traditionele en gangbare beschouwingswijzen in het focussysteem om vervolgens het betreffende focussysteem te beschouwen door de bril van het analogiegebied. Afhankelijk van het abstractieniveau waarop men het systeem beschrijft, kunnen verschillende analogieën van toepassing zijn.

Deze bijdrage gaat in op de bijdragen vanuit de verschillende vakgebieden die tijdens de workshop gepresenteerd zijn. Daarbij worden de gevonden analogieën besproken. Maar eerst wordt kort ingegaan op verkeersmanagement zelf en het zoekproces naar analogieën. De bijdrage is een bewerking en inkorting van het TrafficQuest rapport "Analogieën met verkeersmanagement – Verslag van de workshop" (Immers, *et al.*, 2013). Het verslag en het bijlagenrapport en is te downloaden van de website van TrafficQuest (www.traffic-quest.nl).

2. Over analogieën

Bij het zoeken naar analogieën met het verkeersmanagement proces, kan een onderscheid worden gemaakt naar een tweetal categorieën van gebieden waarin gezocht kan worden. De eerste categorie wordt gevormd door de zogenaamde 'nabije analogieën'. Dit zijn vakgebieden en disciplines waarvan op voorhand kan worden verwacht dat daar sprake zal zijn van analogieën. Het opstellen van een lijst met 'nabije analogieën' kan plaats vinden op basis van kennis en ervaring, aangevuld door de algemene beschrijving van verkeersmanagement in het vorige hoofdstuk. Deze lijst kan aangevuld worden met de tweede categorie analogieën, de zogenaamde 'verre analogieën'. Dit zijn analogieën die niet direct een duidelijke link leggen tussen twee gebieden en dus niet a priori geselecteerd zullen worden. Voor het zoeken naar deze 'verre' analogieën kan gebruik gemaakt worden van een hulpmiddel (zie verderop) dat het mogelijk maakt op een systematische en gestructureerde wijze andere vakgebieden in kaart te brengen en hun analogie met strategische, tactische en operationele processen in het wegverkeer en de sturing hiervan door middel van verkeersmanagement te evalueren.

Hulpmiddel bij het zoeken naar verre analogieën

Het hulpmiddel dat is toegepast bij het zoeken naar 'verre analogieën' ziet er als volgt uit. Op basis van de algemene beschrijving van verkeersmanagement en de verkeersprocessen waarop de verkeersmanagementmaatregelen ingrijpen, is het verkeersmanagement domein geanalyseerd vanuit verschillende invalshoeken. Dit stelde ons in staat specifieke kenmerken van verkeersmanagement te benoemen. In andere vakgebieden en disciplines is vervolgens gezocht naar het voorkomen van deze specifieke kenmerken, dit met als doel mogelijke analogieën met dit vakgebied te achterhalen. Wanneer dit het geval was, is de mate van analogie of overeenkomst, de soort analogie (kwalitatief/kwantitatief/wetmatigheid) en de relevantie hiervan voor verkeer en verkeersmanagement, nader onderzocht. Bij het hulpmiddel voor verre analogieën hebben we de volgende drie beschouwingwijzen onderscheiden (Immers en Westerman, 1996):

1. Gelaagdheid van verkeer en verkeersmanagement

Het verkeersproces en de verkeersmanagementmaatregelen die hierop ingrijpen worden gekenmerkt door een opbouw uit een aantal onderling geschakelde lagen. Deze eerste beschouwingwijze richt zich op het beschrijven, analyseren en in kaart brengen van (de samenhang tussen) deze lagen.

2. Processen en componenten binnen verkeer en verkeersmanagement

Op elke laag van het relevante deel van het verkeerssysteem en de daarmee samenhangende verkeersmanagementinstrumenten vinden bepaalde processen plaats en spelen bepaalde componenten een rol. Deze tweede beschouwingwijze richt zich op het beschrijven, analyseren en in kaart brengen van de betrokken processen en componenten per laag.

3. Gegevensstromen ten behoeve van verkeersmanagement

Op elke laag van het relevante deel van het verkeerssysteem en de daarmee samenhangende verkeersmanagementmaatregelen worden verschillende soorten fysieke verkeersstromen door verkeersmanagement gestuurd, wat verschillende soorten gegevensstromen induceert. Deze derde beschouwingwijze richt zich op het beschrijven, analyseren en laagsgewijs in kaart brengen van de fysieke stromen en de benodigde en gegenereerde gegevensstromen.

Karakteristieken Verkeersmanagement

Op basis van de principes van sturing van verkeer en vervoer door middel van verkeersmanagement (zie hiervoor ook: De Toekomst van Verkeersmanagement, (TrafficQuest, 2012)), en het hulpmiddel voor het zoeken naar verre analogieën, kunnen de gevonden karakteristieken voor verkeer en sturing door verkeersmanagement als volgt worden samengevat:

- De gelaagdheid van het transportsysteem, van de processen die zich daarop afspelen en de sturing ervan (geografie, detailniveau, tijdschaal, organisatiecoördinatie en type maatregel);
- Het optreden van verschillende, deels onafhankelijke, deels afhankelijke (deel)processen;

- De gewenste flexibiliteit/adaptiviteit van de sturing van processen;
- Keuzevrijheid van weggebruikers met onderling verschillende attitudes, waaronder gewoontevorming in keuzegedrag;
- Het optreden van voorspelbare en onvoorspelbare verstoringen;
- Informatieverschaffing aan weggebruikers: vooraf en tijdens de rit, in het voertuig (RDS-TMC, navigatie) en langs de weg (DRIPs); dynamisch en statisch; voorschrijvend, adviserend en beschrijvend;
- Informatie-uitwisseling tussen beheerder en bestuurder, bestuurders onderling en beheerders onderling (coöperatieve systemen);
- Regels (voorschrijvend, adviserend en beschrijvend) die van toepassing zijn op de afwikkeling van de processen en de naleving hiervan;
- Onderscheid naar doelgroepen waarop verschillende regels van toepassing zijn;
- Handhaving en bewaking;
- De noodzaak tot samenwerking tussen verschillende actoren die bij de processen betrokken zijn.

Er zijn dus veel aspecten binnen de toepassing van verkeersmanagement die zich lenen voor een vergelijking met andere systemen. Het was onmogelijk al deze aspecten in de workshop met de gewenste diepgang te behandelen. Daarom is besloten de vergelijking te beperken tot een drietal aspecten:

- Zelforganisatie versus sturing. Organiseert het systeem (proces) zichzelf en hoe gebeurt dat of wordt bewust sturing van buitenaf opgelegd? Indien beide sturingsprincipes voorkomen: wanneer en hoe grijpt men in?
- In hoeverre is er sprake van een gelaagdheid van het systeem en hoe wordt daarmee omgegaan in de regeling (bij voorbeeld door coördinatie tussen de lagen)?
- Op welke wijze worden de robuustheid (systeem kan tegen een stootje) en de betrouwbaarheid (marges in prestatie-indicatoren zijn klein) van het systeem verzekerd? Welke afwijkende situaties treden op in het functioneren van het systeem en hoe is het systeem daarop berekend?

Deze aspecten zijn voorgelegd aan de inleiders van de gekozen vakgebieden:

- Verkeersmanagement – Ben Immers (TrafficQuest);
- Zwermen (biologie) – Charlotte Hemelrijk (Rijksuniversiteit Groningen);
- Logistiek – Walther Ploos van Amstel (Vrije Universiteit Amsterdam);
- Hersenen – Martijn van den Heuvel (Universitair Medisch Centrum Utrecht);
- Communicatienetwerken – Rob Kooij (TNO & TU Delft) en Rob van der Mei (CWI en VU Amsterdam);
- Elektriciteitsvoorziening – Arjan van Voorden (Stedin);
- Betalingsproces – Edward van Dooren (Equens);
- Watermanagement – Wytze Schuurmans (Nelen en Schuurmans);
- Infrastructurele systemen – Frances Brazier (TU Delft).

In het vervolg van deze bijdrage wordt ingegaan op de gevonden analogieën. Een deel van de beschrijvingen is overgenomen uit de notities en voordrachten van de deelnemende experts. Bij elke analogie wordt ook een eerste 'doorvertaling' gemaakt (soms beperkt, soms uitgebreid) naar het verkeersmanagementsysteem.

3. Gevonden analogieën

Biologie (zwermen en scholen)

De bewegingen van dieren zijn met enkele regels te beschrijven die enige overeenkomst tonen met verkeersgedrag, bijvoorbeeld de regels uit een voertuigvolgmodel, bedoeld om botsen te voorkomen. Het is interessant om te kijken in hoeverre simulatiemodellen voor bewegingen van groepen dieren en voor voertuigen/verkeerstromen overeenkomen, en waar ze duidelijk verschillen. Filevorming treedt bijvoorbeeld bij bewegingen van groepen dieren niet vaak op, omdat er meer ruimte is (tussen dieren en daarnaast 3D); bovendien bewegen ze zich voort met ongeveer dezelfde snelheid en ze kunnen sneller reageren dan automobilisten die specifieke handelingen moeten uitvoeren.



Figuur 1: "Startrek" met vogels

Op diverse manieren kan groepsvorming of platooning helpen om verkeersstromen te homogeniseren of de capaciteit te vergroten:

- Platooning op de snelweg: "treintje rijden", gericht op het realiseren van zeer kleine volgtijden. De gedragsregels die van toepassing zijn in zwermen en scholen kunnen wellicht hier ook toegepast worden, maar er kan ook gebruik gemaakt worden van bestaande platooning en C-ACC algoritmes (wellicht in combinatie met een 'lane change' model). Eventueel kan van buiten het peloton een efficiënte, veilige of milieuvriendelijke snelheid opgelegd worden.
- Platooning op stedelijke wegen, om zo efficiënt mogelijk kruisingen te passeren. Hierbij gaat het vooral om het aanhouden van andere (meest lagere) snelheden dan de eigen wenssnelheid, om op een gepast moment een kruising te passeren.
- Groepsvorming in de zin van on-trip vorming van carpools, bijvoorbeeld via smartphones. Dit zou gestimuleerd kunnen worden door op zwaar belaste verbindingen HOV/HOT lanes in te richten, en bij werkgevers of andere bestemmingen gunstig gelegen carpoolparkeerplaatsen.

Bij dieren is ook het groepsgevoel groot. Ze bewegen samen omdat dat de veiligheid vergroot. Zwermen hebben geen leider, hoewel sommige dieren dominanter of meer gemotiveerd zijn (bijvoorbeeld door ervaring of honger). Bij weggebruikers is nauwelijks sprake van groepsgevoel, afgezien van het feit dat men niet op elkaar wil botsen. De vraag is of het nuttig is meer groepsgevoel in verkeersstromen te brengen (al dan niet ondersteund door technologie - op de weg/in het voertuig). Niet alleen de verkeersveiligheid, maar ook de verspreiding van informatie is hiermee gediend.

Logistiek

In het goederenvervoer domein wordt gestreefd naar een steeds betere afstemming tussen goederenketens, vervoerketens en infrastructuurketens. Hierdoor kan, gegeven de actuele en totale vervoersvraag, op elk moment de juiste combinatie van schakels gekozen worden. In één woord wordt dit ook wel met synchromodaliteit aangeduid.

'Bij synchromodaal transport kun je op elk gewenst moment kiezen tussen verschillende modaliteiten, op basis van de actuele omstandigheden... ..Dit betekent dat je iedere keer weer een afweging kunt maken wat de meest wenselijke manier van vervoeren is en welke modaliteiten je daarbij inzet.' (Topteam Logistiek, 2011).



Figuur 2: Flexibiliteit in de keuze van modaliteit

Deze extreme vorm van flexibiliteit is in het goederenvervoer vooralsnog geen realiteit, maar geeft een ideaalbeeld weer.

Een belangrijk element van synchromodaal transport is netwerkregie, waarin status en beschikbaarheid van verschillende vervoersmiddelen wordt overzien en, afhankelijk van de wensen van de consument, de voordeligste, snelste en/of meest duurzame dienst kan worden aangeboden. Zo wordt de klant ook niet gedwongen tot een bepaalde modaliteit, maar zal hij garanties krijgen over vertrek- en aankomsttijden, kosten en kwaliteit van het transport, en zal de vervoerder de uiteindelijk meest aantrekkelijke optie voor de klant leveren.

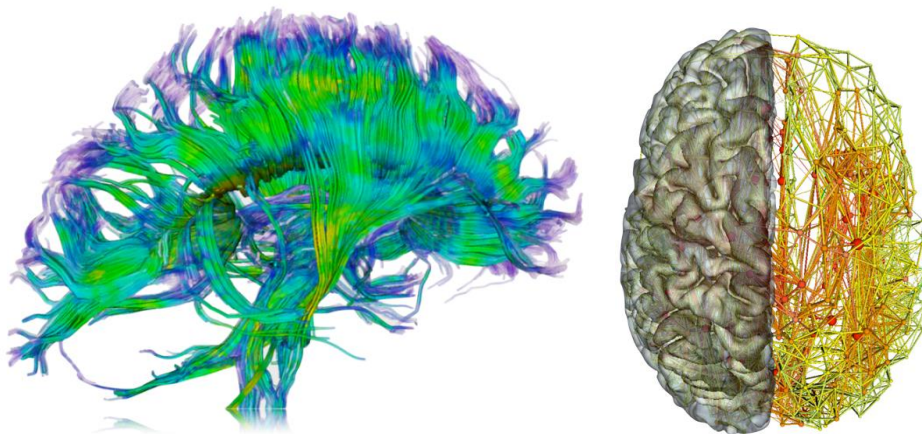
Vertaling naar het personenverkeer toont een toekomstbeeld waarin de reiziger zonder hindernissen van vervoermiddel naar vervoermiddel kan overstappen. In dat geval zou een groot deel van de verplaatsingen bij wijze van spreken al liftend plaats kunnen vinden. In de praktijk zijn deze hindernissen er echter wel (zowel van financiële als van infrastructurele aard). Om binnen het personenverkeer invulling te geven aan synchromodaliteit dienen deze hindernissen eerst weggenomen te worden. En wanneer dat is gebeurd kan synchromodaliteit in het personenverkeer voor een belangrijk deel door middel van zelforganisatie worden ingevuld. Hiervoor is net als binnen de logistiek vereist dat de zogenaamde 'Situational Awareness' van de verschillende actoren wordt vergroot. Dit houdt in dat elke actor over voldoende informatie beschikt om een situatie voldoende te kunnen beoordelen en zo een verantwoorde/optimale beslissing te kunnen nemen. Om de geïdentificeerde hindernissen weg te nemen is, net als in de logistiek, regie noodzakelijk. Vooralsnog zijn er nog veel vraagtekens bij voorbeeld bij de te hanteren organisatiemodellen, bij de transparantie die geboden wordt v.w.b. de prestatie van ieders netwerk en bij het delen van elkaars netwerk.

Hersenen

De hersenen bestaan uit zenuwcellen die onderling verbonden zijn. Deze verbindingen zijn er op de korte, de middellange en op de lange afstand. De verbindingen worden gelegd via elektrische en soms chemische signalen. De menselijke hersenen bestaan uit ongeveer 80 miljard neuronen en 1.000-10.000 keer zoveel connecties, een gigantisch en ook zeer robuust netwerk. Sinds een aantal jaren zijn er studies gestart om de hersenen in kaart te brengen. De belangrijke verbindingen tussen gebieden worden in beeld gebracht en zo ontstaat een soort 'wegenkaart'. Efficiënte communicatie wordt mogelijk gemaakt door het ontstaan van 'communicatiewegen' (de hersensnelwegen) en 'hubs'. Dit is vergelijkbaar met wegennet waarbij 40% van het verkeer wordt afgewikkeld op 4% van het netwerk (snelwegen). Bij de hersenen verloopt 40% van de communicatie over 15% van de verbindingen.

Studies laten zien dat de organisatie van het hersennetwerk mogelijk een belangrijke rol speelt in het functioneren van de hersenen. Efficiënter verbonden hersennetwerken laten bijvoorbeeld een hoger cognitief functioneren zien. Anderzijds is het aannemelijk dat een verstoring van de connectiviteit van de hersenen en andere bedrading van het hersennetwerk een grote rol speelt in de ontwikkeling van neurologische en psychiatrische ziektes.

Binnen de hersenen zijn drie lagen te onderscheiden: neuron, hersengebied en brein. Onderzoekresultaten roepen het vermoeden op dat er een hiërarchische structuur is van connectiviteit met bepaalde gebieden van de hersenen die een belangrijkere rol spelen in globale integratie (denk aan de gebieden die verbonden zijn met de hersensnelwegen). Er is dus aanleiding om aan te nemen dat er een vorm van gelaagdheid is (waarbij bepaalde gebieden een meer integrale rol spelen dan anderen), maar over het effect (en mogelijk functie) van deze gelaagdheid is nog weinig bekend.



Figuur 3: Het menselijk hersennetwerk (connectome).

De hersenen bevatten dus een soort netwerk, maar niet duidelijk is hoe dat gebruikt wordt. Ook lijkt er geen sprake van sturing: neuronen 'vuren' zonder doel. Routing (veel gebruikte verbindingen) lijkt te ontstaan via gewoontegedrag, iets wat ook in het verkeer speelt. Verder is het netwerk heel robuust, zeker op microniveau (afsterven van hersencellen). Op macroniveau wat minder, maar toch nog redelijk (overnemen van functies). Zelfsturing is heel dominant aanwezig, alleen weten we nog niet hoe dat in de hersenen werkt.

Een mogelijke analogie met verkeersmanagement ligt in de in-car toepassingen. Zoals in de hersenen neuronen hun burens signalen geven, zo is het denkbaar dat voertuigen de andere voertuigen in de buurt berichten sturen. De analogie gaat in zoverre mank dat dit in de hersenen schijnbaar doelloos gebeurt. Voor in-car toepassingen is al wel gebleken dat de functionaliteit belangrijk is, o.a. omdat nu de bandbreedte voor communicatie en de verwerkingscapaciteit van boodschappen beperkt is. Het is niet bekend of functionaliteit zomaar lijkt te ontstaan (hersenen) of aangebracht moet worden.

Communicatienetwerk

Verkeerstromen van verschillende diensten (telefonie, data) worden over dezelfde netwerken afgewikkeld. Hierdoor kan de netwerkcapaciteit efficiënter worden benut. Digitale informatie die van A naar B moet worden verzonden wordt in kleinere pakketjes opgedeeld en in pakketten verpakt. Deze worden vervolgens over het netwerk verstuurd, waarna ze bij bestemming B worden uitgepakt en op volgorde worden gezet. Verschillende diensten stellen verschillende eisen aan het netwerk. Binnen communicatienetwerken is het niet bezwaarlijk dat pakketjes af en toe worden weggegooid als dat voor de afwikkeling zo uitkomt. Problemen die in communicatienetwerken ontstaan bij de afwikkeling van verkeer worden vooral veroorzaakt door het onvoorspelbare, random, karakter van het verkeer. Bij problemen in het netwerk wordt in toenemende mate een beroep gedaan op zelforganisatie. Ter beheersing van de communicatiestromen kunnen vier beheersingsmaatregelen worden ingezet. Hieronder worden deze maatregelen besproken en wordt per maatregel ook een doorvertaling gemaakt naar een mogelijke toepassing in verkeersmanagement.



Figuur 4: Beschikbaarheid van internet

'Traffic policing' is een filtermechanisme dat controleert of de gebruiker niet meer dan het afgesproken maximale volume aan verkeer door het netwerk stuurt, zoals vastgelegd in een SLA tussen de netwerkaanbieder en de klant. De meest gebruikte toepassing van traffic policing is het zogenaamde 'Leaky Bucket' mechanisme, waarbij teveel verstuurd pakketten een lage prioriteit krijgen of zelfs worden weggegooid. Er is voor deze maatregel geen parallel te trekken met reguliere verkeersnetwerken. Als er al sprake is van een SLA (Service Level Agreement) in verkeersnetwerken dan is deze eenzijdig. De

wegbeheerder wenst een bepaalde betrouwbaarheid te bieden aan de weggebruiker voor wat betreft de reistijd, maar verwacht hiervoor geen noemenswaardige tegenprestatie van de kant van de weggebruiker. De enige voorwaarden waaraan een weggebruiker nu moet voldoen is dat men beschikt over een geldig rijbewijs en dat de wegenbelasting wordt betaald. Wellicht dat de introductie van een vorm van 'beprijzen' van de verplaatsing hier verandering in kan brengen.

'Traffic shaping' is een filtermechanisme dat ervoor zorgt dat pieken in de verkeersstromen worden afgevlakt, simpelweg door het vertragen van pakketten indien er teveel verkeer in een korte periode aan het netwerk wordt aangeboden. Dit principe is vergelijkbaar met de werking van een toeritdoseerinstallatie in reguliere verkeersnetwerken. Ook een maatregel als spitsmijden kan onder deze categorie maatregelen geschaard worden, hoewel de piek dan een langere tijdsperiode betreft.

'Admission Control' is een mechanisme om te beslissen of nieuwe verkeersstromen worden toegelaten tot het netwerk. Een communicatienetwerk gebruikt daartoe vaak een zogenaamde 'bandwidth broker', die beslist of door het toelaten van een nieuwe verkeersstroom nog wel aan de afspraken (SLA's) met de bestaande klanten wordt voldaan. Dit is vergelijkbaar met de uitgifte van parkeervergunningen in binnensteden. Nieuwe parkeervergunningen worden niet uitgegeven wanneer als gevolg hiervan de parkeernorm wordt overschreden. Ook de milieuzones rondom binnensteden kunnen gezien worden als een vorm van 'admission control'.

'Prioritization' houdt in dat prioriteiten worden toegekend aan verschillende verkeersstromen op basis van hun kwaliteitseisen en het prijskaartje. Binnen communicatienetwerken is het heel gewoon dat real-time verkeer voorrang krijgt op niet real-time verkeer, en dat klanten die veel betalen op de één of andere manier voorrang krijgen op klanten die weinig betalen. Dit type maatregel wordt binnen het reguliere verkeerssysteem maar zeer beperkt toegepast. Vooral omdat dit indruist tegen het gelijkheidsbeginsel. Dat wil echter niet zeggen dat prioriteit in het reguliere verkeerssysteem niet wordt toegepast. Prioriteit wordt bijvoorbeeld gegeven aan voertuigen van hulpverleners, zoals politie, brandweer en ambulance. Daarnaast kan in de regeling van kruispunten prioriteit worden gegeven aan groepen verkeersdeelnemers. Zo kan bij veel kruispunten het openbaar vervoer ongehinderd doorrijden. Ook zijn er voorbeelden waarbij prioriteit wordt gegeven aan langzaam verkeer bij regen (Groningen) en aan vrachtverkeer om milieudoelinden (Helmond). Prioritering vindt (in Nederland) echter nooit plaats op basis van de reistijdskosten van een verkeersdeelnemer. De invoering van bepaalde beprijzingsmaatregelen (denk daarbij bijv. aan de HOT-lanes (High Occupancy & Toll) die in de Verenigde Staten worden toegepast) kan hier echter verandering in brengen.

Elektriciteitsvoorziening

Bij de elektriciteitsvoorziening (EV-systeem) staat balanshandhaving centraal. Het gaat om de afstemming tussen aanbod (= opgewekt vermogen) en vraag (= gevraagd vermogen + verliezen). In het verleden was er veelal sprake van één aanbieder, maar recente ontwikkelingen (windenergie, zonnecellen, etc.) maken de balanshandhaving complex, waardoor sturing vereist is op lagere spanningsniveaus. Het EV-systeem is zelforganiserend ook indien er sprake is van uitval. Dat geldt voor het hoogspanningsnet

en het middenspanningsnet. In deze netten, maar niet in het laagspanningsnet, zit voldoende redundantie. Door de introductie van de elektrische auto vertoont de vraag grotere fluctuaties. Dit maakt sturing op basis van prijs/tarief noodzakelijk.

Overeenkomsten tussen het EV-systeem en het verkeerssysteem zijn de gelaagdheid en de relatie tussen het niveau en de daarmee samenhangende keuze in het netwerk ontwerp. Andere belangrijke overeenkomsten zijn:

- Financiële prikkels kunnen worden ingezet om de vraag te beïnvloeden,
- Als ernstige verstoringen optreden leidt dat tot grote chaos.

Een belangrijk verschil is dat bij een EV-systeem weinig omwegen beschikbaar zijn; sluijverkeer is onmogelijk. Ook zijn er bij een EV-systeem geen doorstroomverschillen: er is wel of geen transport. Andere belangrijke verschillen zijn:

- De EV-hoofdinfrastuctuur wordt niet (gepland) onderbroken,
- Compensatie vergoedingen worden uitgekeerd indien het EV-systeem niet voldoende presteert.



Figuur 5: Koppeling van netten in de elektriciteitsvoorziening

Het verkeerssysteem, gebaseerd op de EV-analogie zou er als volgt uit kunnen zien. Het netwerk kent een gelaagde opbouw. Het verkeer stroomt met een constante snelheid over het netwerk (snelheid kan wel per netwerklaag verschillen). Reizigers (automobilisten) geven bij (gewenst) vertrek aan waar ze naartoe willen gaan, eventueel aangevuld met de voorkeursroute. Op basis van deze gegevens kan de (tijdsafhankelijke) positie in het landelijk netwerkmodel worden bepaald. Indien overbelasting dreigt wordt de reiziger een alternatieve route en/of een alternatief vertrektijdstip aangeboden. Dit advies kan gebaseerd zijn op het first-in-first-out principe of op de bereidheid om te betalen (financiële prikkel). Nu kun je nooit exact bepalen hoe druk het op een weg is (er zit altijd enige spreiding in vertrektijdstip en snelheid). Daarom is het belangrijk om lokaal te kunnen afstemmen. Dat zou kunnen door alle opritte te voorzien van een buffer. Mocht de vraag dreigen groter te worden dan het aanbod, dan kan via een buffer het dreigende probleem worden opgelost.

De dimensionering van het netwerk vraagt enige aandacht. Met uitzondering van de buffers staan de voertuigen nergens stil. Nu biedt het advies voor wat betreft het

vertrektijdstip (in combinatie met een financiële prikkel) veel mogelijkheden tot afvlakken van de piek. Het zal duidelijk zijn dat een ruim gedimensioneerd netwerk minder afstemming vraagt. Het flexibel kunnen inzetten van de capaciteit (flexibele infrastructuur) vermindert de noodzakelijke reservecapaciteit. Bij de dimensionering (en de vastlegging van de structuur van het netwerk) is het noodzakelijk rekening te houden met uitval als gevolg van incidenten, onderhoudswerkzaamheden, etc. en met (lokale) extremen in de vraag, veroorzaakt door evenementen en nadere bijzondere gebeurtenissen. Belangrijk voor het functioneren van dit concept is dat de knooppunten altijd voldoende capaciteit kunnen bieden, dit gegeven de kenmerken van het vraagpatroon. Dit impliceert dat knooppunten (kruispunten) ruim (en flexibel) ontworpen moeten worden.

Betalingsproces (geldverkeer)

Afwikkeling van het betalingsverkeer impliceert de regeling van stromen (in dit geval van transactieberichten). De stromen kunnen pieken vertonen, maar niet op dezelfde tijdstippen als bij de verkeersstromen op de weg. Verder is er sprake van een zeer strak management van de stromen van transactieberichten. Er bestaan duidelijke afspraken tussen de verschillende betrokken partijen, maar niemand heeft de totaalregie in handen. Robuustheid en betrouwbaarheid van het proces zijn zeer belangrijk. Deze kwaliteiten worden op de volgende wijze verzekerd:

- Betalingsverkeerprotocollen gebaseerd op internationale standaarden.
- Beheersprocessen.
- Continue monitoring van processen en meting van prestaties.
- Dubbele uitvoering van applicaties, systemen en netwerken.
- Uitwijksystemen.
- Periodieke interne en externe audits op betalingssysteem (er is een 99,98% betrouwbaarheid tijdens pieken nodig).



Figuur 6: Betalingsverkeer verloopt via gestandaardiseerde protocollen

Het bijzondere van dit systeem is het belang dat men toekent aan robuustheid en betrouwbaarheid; bijgevolg is veel redundantie in het systeem ingebouwd. Kennelijk is

dat financieel haalbaar. Er zijn ook zeer duidelijk afspraken (SLA's) tussen de betrokken partijen. De stromen in het betaalverkeer kennen weliswaar ook pieken, maar die zijn te voorspellen (wel 'evenementen' maar geen 'incidenten'). Het management is sturend en niet informatief. Een groot verschil met wegverkeer is dat betalingsverkeer heel strak gestuurd is: een betaling vergt op allerlei momenten verificatie (ben je wel wie je zegt dat je bent, heb je wel een bankrekening waar genoeg op staat). Voor verkeersmanagement is het interessant te weten hoe besloten wordt waar redundantie in te bouwen en hoeveel. Ook interessant om te weten is hoe de betrokken partijen tot onderlinge afspraken komen.

Enigszins analoog aan alle verificaties bij betalingsverkeer, zou bij het wegverkeer een voertuig pas toegelaten kunnen worden op wegen die overbelast zijn als daarvoor toestemming is gekregen. Dit maakt het nodig dat de toegang tot deze wegen gecontroleerd wordt, bijvoorbeeld in de vorm van doseerinstallaties of 'tolpoorten'. Overigens is het niet per se noodzakelijk om ook tol te heffen. Een voertuig dient een aanvraag in voor een bepaald tijdslot. Die aanvraag wordt ogenblikkelijk of goedgekeurd, of afgekeurd, waarbij in het laatste geval een alternatief tijdslot of een alternatieve route geadviseerd wordt. Er is in deze benadering wel een instantie nodig die de wegcapaciteit beheert en uitdeelt aan weggebruikers (wellicht via service providers). De uitgifte zou op allerlei manieren kunnen, bijvoorbeeld 'first reserved, first served'. Iedereen beschikt over een mobiliteitsbudget, maar men kan ritten bijkopen als daar ruimte voor is.

Toegang tot een wegvak kan aanvullend nog gereguleerd worden door toepassing van toeritdosering in combinatie met een buffer, zodat een goede doorstroming op het wegvak (en de aanliggende wegvakken) gegarandeerd kan worden. Op de meest filegevoelige routes kan redundantie worden ingebouwd, in de vorm van extra inzetbare capaciteit, verwijzing naar alternatieve (niet veel langere) routes met overcapaciteit, buffers, etc. Natuurlijk moeten de betrokken partijen het er wel samen over eens worden waar redundantie in het systeem aangebracht wordt.

Watermanagement

Watermanagement gaat over het beheersen van de waterstromen en bestaat eigenlijk uit twee componenten: afvoer en berging. Watermanagement speelt zich op allerlei niveaus af: van de overheid (bijvoorbeeld Rijkswaterstaat) tot individuele huishoudens. Gelaagdheid in het systeem is daarbij erg belangrijk. Zo vindt de afvoer van water plaats van straatkolk, via rioolbuis, naar rioldistricten en via hoofdriolen naar de afvalwaterzuivering, die weer loost op een kanaal of rivier. Deze gelaagdheid is ook terug te vinden op fysiek, organisatorisch en financieel vlak.

Water wil niets, maar het stroomt wel, van hoog naar laag. Elk watersysteem is een afvoersysteem met een bepaalde buffercapaciteit om piekbelastingen "op te vangen". Wanneer de benodigde berging groter is dan de bergingscapaciteit, loopt het systeem over en ontstaat wateroverlast. Om overlast te voorkomen worden 'kunstwerken' toegepast om de stroom te regelen. En dat geldt ook weer op alle schaalniveaus (van toilet tot de Oosterscheldekering). De frequentie van sturing loopt van seconden tot seizoenen. Ingrijpen gebeurt bij normale omstandigheden vooral op basis van metingen, voorspellingen en beslismodellen. Er wordt veel gemodelleerd. Bij calamiteiten gaat men

over op handbediening en is er sprake van bestuurlijk inmenging bij de te nemen maatregelen. Bestuurlijke verantwoordelijkheid speelt daarbij een grote rol.

De toegestane mate van overlast is vastgelegd in normen. De trend in watermanagement is om van een normbenadering over te gaan naar een risicobenadering, waarbij de schade per jaar wordt bepaald en afgewogen tegen investeringen om deze schade te voorkomen. Andere ontwikkelingen situeren zich op het vlak van informatiemanagement, toepassing van real-time sensoren, real-time control en integraal beheer. Nu wordt nog voornamelijk feedback regelen toegepast, maar feedforward regelen is in opkomst.



Figuur 7: Oosterscheldekering

Verkeersmanagement heeft een sterke analogie met watermanagement. Verkeer wordt vaak gemodelleerd als een vloeistofstroom incl. de daarbij horende theorie. Watermanagement is alleen sturen met behulp van doseerinstallaties en buffers. De fysieke gelaagdheid speelt een belangrijke rol en dat is bij verkeersmanagement ook zo (wegvak, traject, deelnetwerk, netwerk), evenals de organisatorische gelaagdheid (verschillende wegbeheerders). Ook de hierboven genoemde ontwikkelingen in watermanagement kunnen bij verkeersmanagement worden waargenomen.

Een strikte analogie zou ertoe leiden dat verkeer continu gestuurd wordt. Anders dan in de huidige situatie wordt de verkeersstroom dus in alle situaties gestuurd, ook in congestievrije situaties. Door middel van doseren en buffers wordt geprobeerd de geformuleerde doelstellingen te realiseren (in watermanagement is dat de vastgelegde norm). Om het systeem goed te laten functioneren zijn de volgende systeemcomponenten van groot belang:

- Uitgebreide monitoring van het systeem.
- Snelle simulatiemodellen die het mogelijk maken vooruit te kijken (en effecten van voorgenomen maatregelen te berekenen).
- (Voldoende grote) buffers en doseerinrichtingen bij alle overgangen tussen netwerken.

- Samenwerkings- en afstemmingsprotocollen tussen de verschillende netwerkbeheerders.
- 'Dedicated' en dwingende informatieverstrekking aan de verkeersdeelnemer.
- Noodprocedures die ingezet kunnen worden om instorten van het systeem te voorkomen (gecombineerd met toekenning bestuurlijke verantwoordelijkheid).
- Verkeerscentrale(s) die wordt ingezet om het verkeer te bewaken en waar nodig bij te sturen of weer op gang te helpen (incident management).

Infrastructurele systemen

Infrastructurele systemen zijn genetwerkte systemen waarin 3 lagen kunnen worden onderscheiden:

- fysieke laag (fysieke infrastructuur),
- communicatielaag, ICT (dekking, clustering, virtuele organisaties),
- participatielaag (sociale structuren, mens-netwerk interactie, bestuur).

Belangrijke kenmerken van een dergelijk systeem zijn:

- 'self-management': dit vindt plaats binnen elk onderscheiden niveau, en vergt interactie tussen de drie lagen,
- 'self-organisation', het systeem regelt bepaalde dingen zelf door coördinatiemechanismen,
- 'self-healing': de mogelijkheid van het systeem om zichzelf te herstellen van een storing.

Belangrijke uitdagingen bij het vormgeven van het systeem zijn: hoe is dit te realiseren? Welke informatie - en communicatiestructuren werken het beste? Hoe houden we de kwaliteit van het functioneren van het systeem op orde? Hoe zit het met de toekenning van taken en verantwoordelijkheden (accountability)? Zijn garanties ten aanzien privacy gewenst? En zo zijn er meer vragen te stellen.

Zelforganisatie gebaseerd op lokale coördinatie vraagt om een uitwerking van het ontwerp op een drietal gebieden:

- Creëer een vertrouwensbasis (sociale acceptatie, transparantie, veiligheid en zekerheid),
- Werk de autonome componenten uit ('empowerment', 'self-management', 'self-regulation'),
- Denk na over de communicatie (betrokkenheid, aanwezigheid, bekrachtiging).

Gaming is een interessante ontwikkelomgeving om het 'gedrag' van dit soort systemen verder te onderzoeken. Men kan daarbij denken aan exploratie (emergent gedrag, inzichten, effecten van ontwerpkeuzes), 'situational awareness' (hoe, wat, waarom) en training. Gaming verschaft ook mogelijkheden voor simulatie en emulatie bij het bestuderen van het systeem in de loop van de verschillende fasen van systeemontwerp en het verkennen van verschillende ontwerpkeuzes (volledig gedistribueerd vs. centrale sturing, etc.).



Figuur 8: Zelforganisatie of sturing?

Als we zoeken naar analogieën met het verkeerssysteem dan leidt dit tot het basisprincipe dat het verkeer zichzelf managet, waarbij afstemming plaatsvindt op basis van lokale coördinatie (zoals in een zwerm). Verder vindt er voortdurend afstemming plaats tussen de verschillende stakeholders over de te realiseren kwaliteit van de verkeersafwikkeling, de in te zetten sturingsmechanismen, de mate van transparantie, de te garanderen privacy, etc. Men kan daarbij denken aan een forum waarin al deze zaken aan bod komen en op basis waarvan keuzes worden gemaakt. Voortdurende feedback kan aanleiding geven om eerder gemaakte keuzes aan te passen.

Een mogelijke invulling ziet er dan als volgt uit. In eerste instantie gaat iedere reiziger op pad op basis van eigen voorkeuren. De lokale afstemming bestaat eruit dat men in familie- of kennissenverband onderling afstemt en verder vindt er tijdens het verplaatsen lokaal afstemming plaats (bijvoorbeeld ter hoogte van kruispunten, invoegstroken, etc.). Daarbij worden sturingsprincipes toegepast waar men eerder overeenstemming over heeft bereikt. Voorts zullen eisen t.a.v. veiligheid, doorstroming en leefbaarheid zich vertalen in allerlei regels die van toepassing zijn op de verkeersafwikkeling. Monitoring van de kwaliteit van de verkeersafwikkeling, maar ook persoonlijke ervaringen kunnen aanleiding geven om de onderlinge afstemming uit te breiden. Dit is een transparant proces mede waardoor de sociale acceptatie min of meer verzekerd is. Om de onderlinge afstemming te verbeteren zullen de stakeholders bereid moeten zijn om informatie over hun toekomstig handelen te verstrekken. Des te meer informatie men bereid is te delen des te beter de afstemming die kan worden gerealiseerd. Een belangrijk punt daarbij is dat men bereid is de uitkomsten van het sturingsproces te accepteren.

In principe kunnen voor wat betreft de vormgeving van de sturing twee benaderingen worden toegepast. De eerste benadering is gericht op het realiseren van een gebruikersoptimum. Iedereen kiest de voor hem/haar meest gunstige afwikkeling van de verplaatsing. De tweede benadering is gericht op het realiseren van een systeemoptimum. In dat geval wordt de afwikkeling van de verplaatsingen geoptimaliseerd volgens een onderling overeengekomen optimalisatiecriterium. Reizigers accepteren de consequenties hiervan voor wat betreft de afwikkeling van hun eigen reis. Deze laatste invulling heeft echter nauwelijks nog enige relatie met zelforganisatie. Ervan uitgaande dat enige zelforganisatie toch gewenst is, resteert de uitwerking op basis van het gebruikersoptimum. Deze uitwerking verschaft geen enkele garantie voor wat betreft

de optimale afwikkeling van het verkeer. Maar ook in dit geval is het altijd mogelijk verbeteringen in de verkeersafwikkeling te suggereren (bijvoorbeeld op basis van het 'fairness' principe). Indien er consensus over een verbeteringvoorstel verkregen wordt kan de nieuwe regeling worden ingevoerd. Snelle betrouwbare communicatie is belangrijk om dit soort verbeteringsprocessen te ondersteunen, maar het zal ook duidelijk zijn dat consensus in veel gevallen niet snel verkregen zal worden, zeker als er winnaars en verliezers zijn. Een gevolg daarvan is dat het systeem altijd ondermaats blijft presteren.

Dezelfde procedures kunnen worden toegepast bij incidenten en evenementen, waarbij dan wel de kanttekening geplaatst dient te worden dat urgente situaties eerder vragen om een oplossing, met als kanttekening dat indien een beslissing op basis van consensus niet tijdig genomen kan worden, deze geforceerd zal moeten worden. Dit zou kunnen impliceren dat reizigers bereid zijn de keuze voor het toe te passen sturingsprincipe (een reeks van maatregelen) over te laten aan een externe onpartijdige instantie die heeft aangetoond op een professionele wijze dit soort problemen te kunnen oplossen.

4. Conclusies

Deze bijdrage beschrijft de resultaten van een workshop waarin is nagedacht over analogieën vanuit verschillende vakgebieden (nabij en minder nabij) met verkeersmanagement. De resultaten tonen aan dat vanuit elk vakgebied interessante vergelijkingen te maken zijn. In deze studie blijft de vergelijking grotendeels beperkt tot 3 invalshoeken: de toegepaste sturingsprincipes, de gelaagdheid van het systeem en de robuustheid van het systeem. Op grond van de analyse en vergelijking van de verschillende systemen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Sturingsprincipes

- In veel systemen wordt zelforganisatie als dominant besturingsprincipe gehanteerd, maar in een aantal andere systemen (betalingsstelsel, EV-systeem, watermanagement) wordt het principe van centrale sturing met veel succes toegepast.
- Een belangrijke factor die van invloed is op het toe te passen besturingsstelsel is de mate waarin de te transporteren personen/goederen/gegevens beschikken over vrijheid in het keuzegedrag. In het verkeersstelsel is de keuzevrijheid erg groot. Daarnaast zijn veel onafhankelijke partijen betrokken bij het verlenen van diensten. Deze kenmerken leiden bijna per definitie tot een zelforganiserend systeem. Toepassing van het principe van centrale sturing vereist een drastische inperking van de keuzevrijheid in combinatie met strikte protocollen tussen de verschillende stakeholders voor wat betreft het regelproces (zie bijvoorbeeld betalingsproces geldverkeer)
- Ondanks de grote vrijheid in keuzegedrag, kan het verkeersproces aan de hand van een beperkt aantal regels worden beschreven (kiezen snelheid en route, volggedrag en strookwisselgedrag). In die zin vertoont het verkeersafwikkelingsproces overeenkomsten met zwermen. Maar in zwermen bewegen de dieren zich wel voort met nagenoeg dezelfde snelheid en in een zwerm bestaat een groot groepsgevoel. Deze twee kenmerken bieden interessante aanknopingspunten voor verbetering van de kwaliteit van de verkeersafwikkeling (platooning en bereidheid tot onderlinge afstemming rijgedrag).

- In veel systemen speelt continue, gedetailleerde monitoring een grote rol. Sturingsmaatregelen, ook proactief, worden op basis van meetresultaten in combinatie met simulatiemodellen genomen. In het verkeersmanagementproces kan een vergelijkbare aanpak worden toegepast (het begin is er), maar dan is wel een meer uitgebreide monitoring gewenst waarbij de betrokken stakeholders bereid zijn de verzamelde gegevens onderling uit te wisselen.
- Uitgaande van de keuzevrijheid van de reiziger kan een verbetering van de 'situational awareness' op verschillende niveaus het keuzeproces verbeteren (men moet ook dan bereid zijn informatie te delen). Door de juiste informatie tijdig aan de gebruiker beschikbaar te stellen kan het principe van zelforganisatie goed functioneren.

Gelaagdheid

- Veel systemen zijn gelaagd. Deze gelaagdheid bestaat zowel in de ruimte als in de tijd. Gelaagdheid is noodzakelijk omdat het veelal niet mogelijk is het gehele systeem in al zijn facetten te overzien (en centraal te besturen).
- Goede/strakke communicatie/interactie tussen de verschillende lagen (onderscheiden beslisniveaus) is gewenst om een systeem optimaal te laten functioneren). Daarbij zal de focus naast het operationele niveau ook op het tactische en strategische niveau gericht moeten zijn. Het elektriciteitsnetwerk en het waternetwerk zijn mooie voorbeelden van hoe een gelaagd systeem geregeld kan worden.
- Gelaagdheid van het systeem vraagt ook om gelaagdheid in de sturingsmaatregelen.

Robuustheid - Verstoringen

- Veel systemen worden ontworpen op de maximale vraag. Toepassing van dit principe op het verkeerssysteem vraagt forse investeringen die naar verwachting niet door omvangrijke baten worden gecompenseerd. In andere systemen worden ter bestrijding van piekbelastingen uiteenlopende principes toegepast, zoals grote flexibiliteit in de toekenning van de capaciteit, het aangaan van SLA's tussen beheerder en klant en het gedifferentieerd beprijzen. Een interessante analogie voor het ontwerp van het verkeerssysteem is de in watermanagement toegepaste risicobenadering.
- Ook al treedt veelvuldig schaarste op in het verkeerssysteem, in het ontwerp is er weinig aandacht voor redundantie. In andere systemen (met grote fluctuaties in de vraag) moet de redundantie ervoor zorgen dat het systeem in de lucht blijft
- Diverse systemen hebben een grote onderlinge afhankelijkheid. Dit kan ertoe leiden dat problemen in het ene systeem grote problemen in het andere systeem veroorzaken. Zo speelt het ICT-systeem een grote rol binnen verkeersmanagement. Ook is het mogelijk dat het oplossen van een probleem in het ene systeem juist problemen in een ander systeem juist problemen oproept (de introductie van elektrische voertuigen leidt mogelijk tot problemen in het elektriciteitsnetwerk). Toepassing van het principe van zelforganisatie kan de afhankelijkheid tussen systemen beperken.
- Invoering van het principe van synchromodaliteit (logistiek systeem) kan de flexibiliteit van het verkeerssysteem aanmerkelijk vergroten. Essentieel is dan wel dat het overstapproces vergemakkelijkt wordt. Verder zal de 'situational awareness' van zowel de reiziger als de netwerkbeheerder verbeterd moeten worden.

Hoe verder?

De nieuw verkregen inzichten zullen worden gebruikt om enige duidelijk verschillende invullingen van het verkeersmanagementsysteem uit te werken (technisch, organisatorisch, verkeerskundig) en onderling te vergelijken. Op dit moment denken we aan de volgende invullingen:

- Volledige zelforganisatie;
- Sterke sturing;
- Mengvorm tussen volledige zelforganisatie en sterke sturing.

De uitgewerkte systemen zullen worden verbeeld middels een essay waarin de beleving van de gebruiker centraal staat (hoe ervaart de reiziger de gekozen verkeersmanagement aanpak?).

Tot slot zal worden beargumenteerd welke invulling (technisch-organisatorisch) van verkeersmanagement de voorkeur verdient indien men de vraag wil beantwoorden hoe het verkeersmanagementsysteem eruit zou zien indien men het geheel vanuit het niets ('from scratch') zou mogen opzetten. De beantwoording van deze laatste vraag was een belangrijke aanleiding voor het uitvoeren van de in deze bijdrage beschreven studie.

Referenties

Immers, L.H. en Westerman, M. (1996), Analogieën met verkeer en vervoer met nadruk op dynamisch verkeersmanagement, TNO-INRO rapport nr. 95/NV/310. In opdracht van Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer, december 1996.

Immers, L.H., Taale, H., Wilmink, I. en Van Katwijk, R. (2013), Analogieën met verkeersmanagement – Verslag van de workshop 16-11-2012, TrafficQuest, april 2013.

Maxwell, J.C. (1927), The Scientific Papers, pp. 215-229, Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association, September 15, 1870.

Miklovic, D.T. (1993), Real-Time Control Networks, Instrument Society of America, North Carolina, USA, 1993, ISBN 1-55617-231-I.

Topteam Logistiek (2011), Partituur naar de top, Connekt, Delft, juni 2011.

TrafficQuest (2012), De toekomst van Verkeersmanagement, TrafficQuest, Centre for Expertise on Traffic Management, Delft, 2012.