

Prof.dr.ir. J.W.C. van Lint

# Traffic under a Microscope

Inaugural speech

April 2nd, 2014

Faculteit Civiele Techniek  
en Geowetenschappen



# DiTTlab

Delft integrated  
Traffic & Travel  
Laboratory

## Traffic under a Microscope

Intreerede

In verkorte vorm uitgesproken op 2 april 2014  
ter gelegenheid van de aanvaarding van  
het ambt van hoogleraar 'Traffic Simulation & Computing'  
aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
van de Technische Universiteit Delft

door

Prof.dr.ir. Hans van Lint

**Inaugural speech Prof. Dr. Ir. Hans van Lint**  
AvL Chair Traffic Simulation & Computing

April 2<sup>nd</sup>, 2014  
18:00 Inaugural speech  
18:30 Reception  
Aud / Congresstrum  
TU Delft

Knowledge discovery in the traffic sciences begins and ends with data, just like in any empirical science.

However, processing data begins and ends with knowledge. Without ideas of what we might find and how we could use it, we're probably not gonna find anything (useful).

I will present my plans for an integrated traffic and travel laboratory that will combine (open) data with (open-source) traffic simulation.

**Traffic under a Microscope**

In this lab we put (big) data in perspective, and ...

DiTTLab full integrated traffic & travel laboratory

*Mijnheer de Rector Magnificus, leden van het College van Bestuur,  
collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap.  
dames en heren,*

Toen ik Juli 2013 door mijn decaan werd gebeld dat "onze faculteit er een nieuwe AvL hoogleraar bij had" was dat niet onverwacht, maar ik had niettemin een paar glazen nodig om de volle lading daarvan tot me te laten doordringen. Een Antonie van Leeuwenhoek (AvL) leerstoel aan de TU Delft is een grote eer en ik mag me in een rijtje hele knappe koppen scharen. Een AvL leerstoel is ook een buitenkans om een onderwerp waarvoor nog geen aparte leerstoel bestaat (maar dat wel verdiend) in de spotlight te zetten. In mijn geval is dat het simuleren van verkeer inclusief alle datawerking en berekeningen die je nodig hebt om met zo'n verkeersimulatie zinvolle voorspellingen te doen. Om verkeer te kunnen simuleren zijn natuurlijk theorieën en (wiskundige) modellen nodig die het onderliggende gedrag van verkeersdeelnemers (automobilisten maar ook fietsers of voetgangers) beschrijven. Maar dat is maar het halve werk—of misschien nog veel minder dan dat. Die wiskundige modellen moeten in efficiënte en robuuste computer code worden vertaald. Verkeerssimulaties vereisen ook een grote hoeveelheid invoergegevens en hebben grote hoeveelheden instelbare parameters die het rij- en reisgedrag bepalen. Al die variabelen en parameters moeten door middel van wiskundige en computationele methoden uit data worden geschat. Tenslotte zijn voor de interpretatie van de resultaten ook geavanceerde visualisatie technieken nodig. Er komen, kortom, heel veel disciplines samen bij het bouwen van verkeerssimulaties.

Niettemin begint en eindigt het simuleren van verkeer met kennis over het verkeersproces. In dit boekje wil ik kort uiteen zetten wat we weten van verkeer (en hoe we dat weten) en natuurlijk ook wat we nog niet weten en op welke manier ik hoop een bijdrage te leveren om dat gat te dichten. Maar eerst iets over Antonie van Leeuwenhoek zelf.

Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) woonde het grootste deel van zijn leven op een steenworp afstand van mijn huidige huis in de mooiste binnenstad van Nederland—vergeef me het chauvinisme, maar ik ben geboren en getogen in Delft. Getraind als vakman in stoffen en weefsels was van Leeuwenhoek al op jonge leeftijd gefascineerd door het bekijken en analyseren van deze materialen door vergrootglazen en microscopen. De microscoop was waarschijnlijk een uitvinding van Nederlandse bodem (die eer gaat naar Zacharias Jansen eind 16e eeuw) maar kreeg door de Engelsman Robert Hooke (een tijdgenoot van Van Leeuwenhoek) grote bekendheid. Hij zag in kurk en andere materialen wonderlijk regelmatige hokjes die

hij "cellen" noemde. Wat Hooke zag waren geen cellen, maar uitgeharde omhulsels rond allang vergane cellen. Van Leeuwenhoek was de eerste die cellen echt waarnam, ook in levende materie.

Een andere beroemde Delvenaar en persoonlijke vriend, Rienier de Graaf, bracht Antoni van Leeuwenhoek in contact met de Royal Society, destijds en nog steeds een belangrijk Europees wetenschappelijk forum. Die kennismaking leidde tot meer dan 500 publicaties waarin van Leeuwenhoek met zijn superieure microscopen, de wereld van het hele kleine voor de wetenschap en het brede publiek voor het eerst toegankelijk maakte. Van Leeuwenhoek beschreef voor het eerst bacteriën en cellen van alle denkbare planten en beestjes, inclusief de cellen hij zonder blijvende schade uit zijn eigen lichaam kon halen.

Van Leeuwenhoek is zonder twijfel de Godfather van de microbiologie, maar hij staat ook in "top 5 lijstjes van invloedrijke wetenschappers" van collega's uit heel veel andere disciplines, van kosmologie tot deeltjesfysica en zeker ook in de ingenieurwetenschappen. De reden daarvoor is niet alleen dat hij heel veel papers schreef, maar vooral ook dat hij gereedschap ontwikkelde waarmee de wetenschap een enorme stap vooruit kon maken. En dat maakt elke TU Delft hoogleraar schatplichtig aan deze briljante stadgenoot.

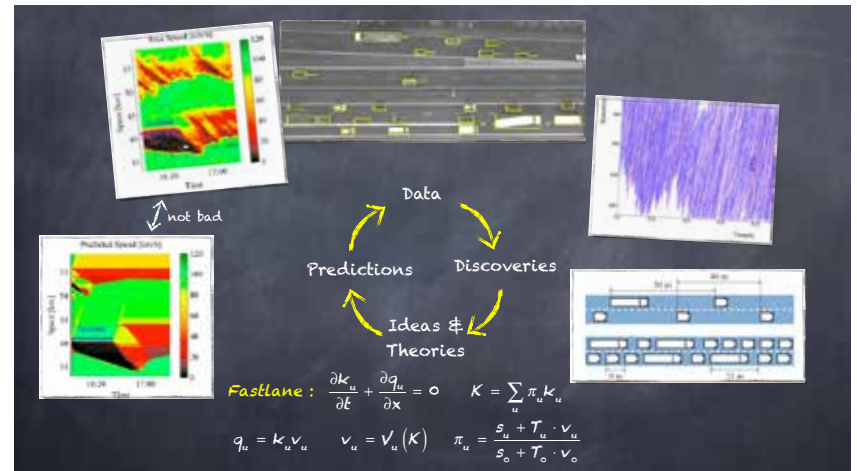
Ik wil iets in de geest van Van Leeuwenhoek doen: tools ontwikkelen om verkeer beter te kunnen bekijken en onderzoeken en ik mag heel blij zijn als ik daar een fractie van de impact mee kan sorteren die van Leeuwenhoek had. Maar ik heb wel het voordeel dat ik voort kan bouwen op het werk van, en kan samen werken met experts uit heel veel verschillende disciplines, binnen de TU Delft en daarbuiten. Een fantastisch vooruitzicht!

### WAT WETEN WE VAN WEGVERKEER EN HOE WETEN WE DAT?

Het antwoord op die tweede vraag is eenvoudig: door naar data te kijken. Figuur 1 illustreert de route die dan wordt afgelegd: van data naar ontdekkingen en ideeën, van ideeën naar theorieën en via voorspellingen weer terug naar data.

- Het begint in dit geval met videobeelden geschoten vanuit een helicopter (Figuur 1 midden boven). Die videobeelden vertalen we (met behulp van geavanceerde videobewerkingsalgoritmes) in trajectorieën van voertuigen. Zo'n trajectorie is een lijn die de positie van een voertuig over de tijd weergeeft, en heel veel trajectorieën over een snelweg segment zien er dan uit als de klauwen spaghetti in Figuur 1 (rechtsboven).

- De volgende stap is om in die trajectorieën naar terugkerende patronen te zoeken. Die brengen ons op ideeën, hypotheses—zou het zo kunnen zijn dat ...? Eén van de hypotheses is dat de hoeveelheid ruimte die een vrachtwagen inneemt ten opzichte van een personen auto kan worden uitgedrukt als functie van de snelheid. Immers, als het niet zo druk is op de weg en de snelheid hoog nemen vrachtwagens relatief niet veel meer ruimte in beslag dan personenauto's. Maar dat verandert naarmate de snelheid lager wordt. In het extreme geval: een file met 100 vrachtwagens is zeker vier maal langer dan een file met honderd mini's. Figuur 1 (rechtsonder) illustreert dit principe. En er zijn natuurlijk heel veel andere verschillen in rijgedrag en voertuigkenmerken tussen vrachtwagens en mini's die relevant zijn om mee te nemen.



Figuur 1

- Als voldoende van die ideeën zijn uitgewerkt kunnen ze worden gestructureerd tot een samenhangende theorie en bijbehorende wiskundig modellen. Figuur 1 (midden onder) laat de wiskunde zien achter Fastlane, een nieuw multi-class macroscopisch verkeersmodel, waarin expliciet verschillende voertuigklassen met hun verschillende kenmerken kunnen worden meegenomen. Daar kom ik later nog op terug
- Tenslotte gaan we toetsen (of juist falsifieren) of het model instaat is om voorspellingen te doen onder allerlei relevante omstandigheden. In dit geval wordt Fastlane gebruikt om de verkeersdynamica te voorspellen op de A15 richting de Rotterdamse haven. Juist op die snelweg is het erg

belangrijk om vrachtverkeer goed te modelleren. Figuur 1 (linksboven) laat een vlekkenkaart zien van de echte data en linksonder de benadering met Fastlane. Het scenario hier is een ongeluk waarbij een rijstrook moest worden afgesloten. De resultaten geven veel vertrouwen dat deze aanpak inderdaad heel kansrijk is.

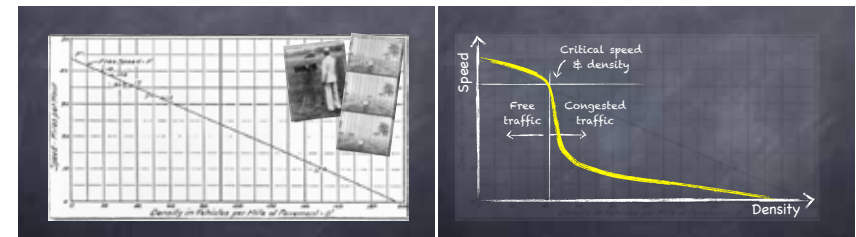
We gaan dus van data naar ontdekkingen in die data; naar hypothesen en theorieën; en dan via voorspellingen weer terug naar data. Dat is in een nutshell de wetenschappelijke methode! Deze cirkel wordt continue doorlopen en elke nieuwe ronde levert weer nieuwe inzichten, ideeën of theorieën op. Ik kom straks nog terug op de stappen tussen het formuleren van een wiskundig model en het bouwen van een simulatie model. Maar eerst een publiek geheim: want het bollen en pijlen schema in Figuur 1 schetst een veel te gestructureerd onderzoeksproces. Neurowetenschapper Stuart Firestein beschrijft in een hele leuke TED-talk het onderzoek in zijn lab als volgt: "It looks a lot less like the scientific method and a lot more like farting around ... in the dark"<sup>1</sup>. Vrij vertaald: we klooiën vaak maar wat aan tot we iets vinden dat werkt en de moeite waard is om verder uit te vogelen.

Maar er zit wel degelijk structuur in dat geklooi. Onderzoek mislukt veel vaker dan het iets oplevert, en die miskleunen zorgen voor richting en voortgang. Hypothesen die geen stand houden maken helder wat we nog niet begrijpen. Onderzoeksaanpakken die niet blijken te werken leiden tot de onderzoeksvragen die relevant zijn. En pas dan vinden we juiste experimentele methodes en de interessante antwoorden waarmee oplossingen en toepassingen kunnen worden ontwikkeld.

Onderzoek kan dan ook op alle plekken in de cirkel beginnen. Soms begint de zoektocht (in het donker) met een fundamentele vraag of een geniale ingeving en duurt het heel lang voor deze worden bevestigd met data. Denk maar aan het Higgs boson. Een andere keer begint de zoektocht met waarnemingen en duurt het heel lang voor een theorie wordt gevonden die deze verklaren. Darwins geniale gedachte (evolutie door natuurlijke selectie) ontstond op die manier.

Een betere metafoor voor wetenschappelijk onderzoek doen (dan heel gestructureerd de regels van de wetenschappelijke methode toepassen) is dan ook het spelen van een spel waarin de uitkomst noch het pad er naar toe van te voren vaststaat. In plaats van dobbelstenen gebruiken we logica en waarnemingen om de volgende zet te bepalen. De spelregels zijn simpel: stel alles ter discussie, toets alle ideeën en volg het empirisch bewijs, ook al wijzen

die volstrekt de andere kant op dan initieel bedacht. Je begint ergens en ziet wel waar het bewijs je heenvoert. Universiteiten moeten daarom investeren in goed uitgeruste speeltuinen waar wetenschappers en studenten "lekker kunnen aanklooiën". In die speeltuinen kan het onderzoekspel op het hoogste niveau gespeeld worden. En als de markt en overheid zo af en toe komen meespelen leidt dat ook tot geweldige innovaties. Ik wil zo'n speeltuin bouwen voor verkeersonderzoek, omdat voortgang in dat vakgebied heel erg hard nodig is. De geschiedenis van modern verkeersonderzoek begint in de jaren 30 van de vorige eeuw.



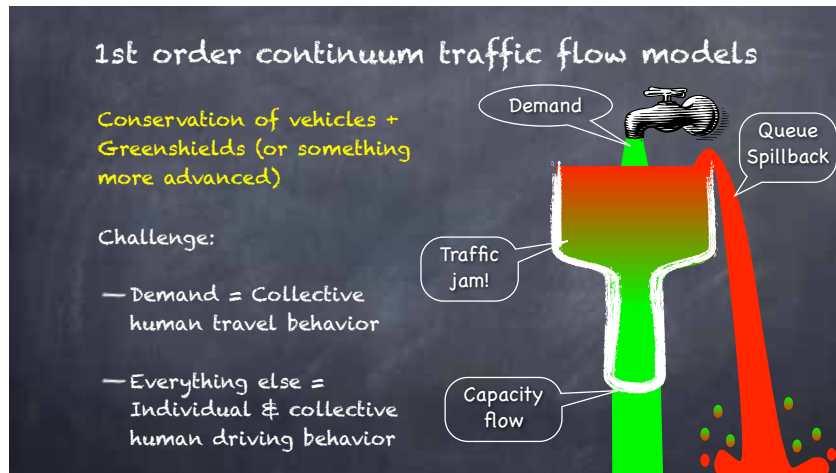
Figuur 2

Bruce Greenshields (1893, Winfield (Kansas) - 1979, Tyler (Texas)) bedacht in die periode een ingenieuze manier om een al iets oudere hypothese te testen. Die hypothese is dat de snelheid waarmee iemand rijdt evenredig is met de afstand tot zijn voorganger. Hoe kleiner die volgafstand, hoe lager de snelheid. Je zou ook kunnen zeggen, hoe lager de snelheid, hoe dichter we op elkaar durven te rijden, het is maar hoe je het uitlegt. Om die (statistische) relatie te kunnen kwantificeren gebruikte Greenshields een camera en een ingenieus systeem om automatisch een serie fotos te maken van voorbij razende auto's. Met de data die hij verzamelde construeerde hij zo de eerste empirische snelheid-dichtheid relatie (het zogenaamde basisdiagram voor wegverkeer), zie Figuur 2 links.

De vorm van die relatie veranderde in de loop van de jaren—nieuwe data zorgde voor verbeterde inzichten. We weten nu bijvoorbeeld dat de snelheid bij de overgang van vrij verkeer naar congestie heel snel daalt (Figuur 2 rechts) en dat de vorm ervan belangrijk is voor de manier waarop verstoringen zich in een verkeerstrook voortplanten. Het basisdiagram is nog altijd één van de belangrijke pijlers van de verkeerstromtheorie. Een tweede pijler (en de enige echt fysieke wet) in de verkeerskunde is **de wet van behoud van voertuigen**. Die wet stelt simpelweg dat als er in een bepaald stuk weg meer verkeer instroomt dan uitstroomt, het aantal voertuigen op dat stukje weg

moet toenemen. In de jaren zestig werd de wiskunde uitgewerkt<sup>ii</sup> die deze wet koppelt aan het basisdiagram en daarmee de eerste orde verkeerstromtheorie die we nog steeds toepassen.

Wat die theorie beschrijft is te vergelijken met wat er gebeurt als we een kraan openzetten boven een omgekeerde fles. Als er meer verkeer uit de kraan komt dan door de flessenhals heen kan, daalt de snelheid vlak boven de flessenhals en ontstaan er files die tegen de richting van de stroom in bewegen. De verkeerstrom is daarbij comprimeerbaar. Hier zien we Greenshields in actie: hoe dichter de stroom (hoe kleiner de afstanden tussen de voertuigen) hoe langzamer deze bewegen en hoe roder de kleur in Figuur 3.



Figuur 3

Wat er uit de kraan komt is het resultaat van collectief (keuze)gedrag: waar gaan we heen, wanneer, hoe en met welke vervoerwijze? Wat er in de fles zelf gebeurt is ook het resultaat van collectief menselijk (rij)gedrag. De breedte van de bottleneck (de capaciteit) is geen eigenschap van asfalt maar het resultaat van rijgedrag: hoe dicht durf je achter je voorganger te rijden bij hoge snelheid? Er gebeurt in echt verkeer nog iets vreemds: zodra file ontstaat, wordt de flessenhals ietsje kleiner: de zogenaamde capaciteitsval. Er zijn dus heel verschillen tussen verkeer en vloeistof stromen, sommige voor de handliggend, maar sommige

<sup>ii</sup> Het wiskundige gereedschap bestaat al heel lang en beschrijft de dynamica van (niet) comprimeerbare vloeistoffen, Lighthill & Witham (On Kinematic Waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads. Proc. R. Soc A 229, 317 (1955)) and Richards (Shock waves on the highway. Operations Research 4, 42 (1956)) waren de eerste die deze op verkeer toepasten.

veel minder<sup>iii</sup>. De consequentie van die typische verkeerskarakteristieken is dat verkeer zichzelf als het ware in de soep: hoe meer voertuigen er door de flessenhals willen hoe slechter de afwikkeling daar wordt.

Maar er gebeurt meer dan individueel rijgedrag. Er is ook sprake van systeemdynamica: een file slaat terug tegen de richting van de stroom in, al blijft het verkeer zelf natuurlijk vooruit rijden. In netwerken speelt de manier waarop verstoringen (zoals een file) zich verplaatsen een hele belangrijke rol. Ook routekeuze speelt een belangrijke rol in netwerken: dat bepaalt hoe verkeerstromen zich over een netwerk verdelen en in welke flessenhalsen er mogelijk problemen ontstaan. Je kunt dus zeggen dat die systeemdynamica en ook routekeuzeprocessen op een hoger schaalniveau plaatsgrijpen dan rijgedrag.

## MULTI-SCALE REPRESENTATIES VAN VERKEER EN NETWERKEN

En dat brengt ons bij een belangrijk punt. Wegverkeer is een proces dat—net als heel veel processen in het universum—op heel veel schaalniveaus kan worden beschreven<sup>iv</sup>. De keuze voor een specifiek schaalniveau is afhankelijk van welke fenomenen men wil reproduceren. Met schaalniveau bedoel ik in dit verband twee dingen:

1. Hoe wordt verkeer gerepresenteerd? Kijken we naar de stroom of naar individuele voertuigen, en hoe beschrijven we het rij- en reisgedrag; individueel of ook gemiddeld?
2. Hoe wordt de infrastructuur waarop dat verkeer rijdt gerepresenteerd? Is dat een 1-op-1 afbeelding van het asfalt en de strepen die er op staan of representeren we de infra met bollen en pijlen, en wat betekenen die dan?

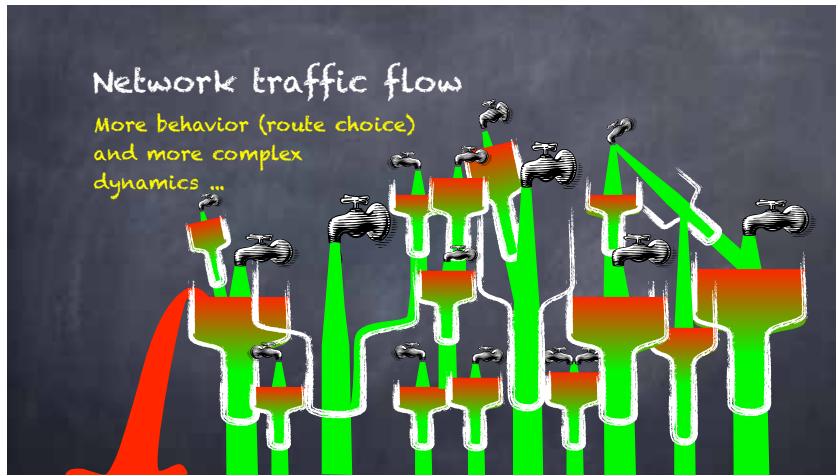
De eerste-orde flessenaanpak van zojuist is een voorbeeld van een macroscopisch verkeersmodel waarin verkeer wordt gerepresenteerd als een continue (comprimeerbare) stroom. Als we een dergelijk model willen toepassen in een netwerk dan representeren we dat netwerk als een stelsel aan elkaar gekoppelde flessen en pijpen waar het verkeer dan letterlijk doorheen stroomt, zie Figuur 4.

<sup>iii</sup> Als u er even over nadenkt slaat zo'n vloeistof representatie natuurlijk helemaal nergens op. In een druppel water zitten meer watermoleculen dan er ooit voertuigen zijn geweest of zullen zijn op de hele aardbol. Die vergelijking tussen verkeer en vloeistoffen zal dus op allerlei manieren mank gaan en dat is ook zo. Maar die benadering blijkt een aantal fenomenen weldegelijk heel aardig te kunnen reproduceren en we kunnen er ook prima voorspellingen mee doen.

<sup>iv</sup> Die beschrijvingen zijn meestal niet consistent, dit is een van de thema's in het promotie werk van Mahtab Joueiai, zie bijvoorbeeld Joueiai, M., Van Lint, H., Hoogendoorn, S. Generic solutions for consistency problems in multi-scale traffic flow models - Analysis and preliminary results (2013) IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems



Om met zo'n model verkeer te simuleren en te voorspellen hebben we natuurlijk data nodig om te zorgen dat de parameters in ons model plausible waarden hebben. Die parameters beschrijven het gemiddelde rijgedrag onder allerlei omstandigheden—ze bepalen de vorm van het basisdiagram van zojuist: de capaciteit, de kritische snelheid, etcetera. Dat soort parameters zijn redelijk goed uit data te schatten die we verzamelen uit bijvoorbeeld lussen in de weg of allerlei andere meetsystemen. Maar we hebben nog veel meer data nodig. Hoe groot is de verkeersvraag? Waar gaat dat verkeer naar toe gaat en langs welke routes? Dat zijn zaken die veel lastiger uit data te halen zijn.



Figuur 4

Laat ik u een voorbeeld geven. Het verkeersnetwerk uit Figuur 5 bevat 3250 herkomst-bestemmingsparen, dat zijn combinaties van plekken waar verkeer vandaan komt en naar toe gaat. Nu willen we graag weten hoeveel verkeer voor elk HB paar op stap gaat, bij voorkeur ook op verschillende tijdstippen van de dag. Kunnen we die stromen schatten met telgegevens verzamelt op 350 plekken waar we voertuigen daadwerkelijk tellen? Dat is "lastig" zonder heel erg veel aannames te doen<sup>v</sup>.

<sup>v</sup> Dit is een eufemisme. Dat er meer vrijheidsgraden dan beschikbare data zijn impliceert dat het systeem onbepaald is. Er zijn immers oneindig veel HB matrices (met 3250 cellen) die dezelfde 350 metingen zouden kunnen verklaren. De enige manier om toch een HB matrix te selecteren is door bijvoorbeeld te eisen dat die HB matrix heel erg op een historische HB matrix moet lijken of door additionele data te gebruiken.

Eén van mijn AiOs is eind 2014 gepromoveerd op een aanpak die het schatten en voorspellen van de verkeersvraag een heel stuk makkelijker maakt<sup>vi</sup>. Ze doet dat door met slimme technieken het aantal herkomst-bestemmingsrelaties drastisch te verminderen met soms meer dan 90%. Met behulp van de overgebleven 50 relevante HB paren is het dan mogelijk om de variatie van de complete verkeersvraag over de dag te voorspellen. En dat maakt het probleem wel oplosbaar, alhoewel ook in dat geval nog wel de nodige aannames moeten worden gemaakt.



Figuur 5

Die aanpak, het drastisch vereenvoudigen van het probleem, omdat het anders niet oplosbaar is of antwoorden oplevert die geen enkele voorspellende waarde hebben, is een aanpak die in veel bredere zin kan worden toegepast. Bijvoorbeeld, als de precieze dynamica van verkeer niet zo heel relevant is voor een bepaalde toepassing, dan is het verstandig verkeer in netwerken veel grover te beschrijven dan met eerste orde verkeerstromtheorie.

Ik noem zo'n grof type verkeersmodel maar even een **metascopisch** verkeersmodel (een "abstracte" manier van kijken naar verkeersafwikkeling in netwerken - zie Figuur 6). Het achterliggende idee is dat de verkeersafwikkeling in stadsdelen of zelfs hele steden kan worden gemodelleerd als een badkuip met kranen en afvoerputjes. Het bijzondere is dat op dit abstractie niveau verkeersafwikkeling in netwerken weer overzichtelijk wordt. Wetenschappers, waaronder collega's hier op de TU Delft hebben aangetoond dat er een optimale

<sup>vi</sup> Tamara Djukic is gepromoveerd op het schatten en voorspellen van dynamische herkomstbestemmingsmatrices op 18 november 2014 (online OD demand estimation and prediction, beschikbaar via the TU Delft repository <http://library.tudelft.nl>)

hoeveelheid verkeer in de badkuip past waarbij de uitstroom maximaal is. Maar, hoe voller de badkuip boven dat ideale punt komt, hoe minder verkeer er kan uitstromen, to aan het punt van complete "gridlock"<sup>vii</sup>. Ook hier zien we weer dat verschil tussen verkeer en water: ook in netwerken draait verkeer zichzelf in de soep.



Figuur 6

Die badkuipen kun je ook weer aan elkaar knopen met pijpen waar het verkeer doorstroomt. Het resultaat is een heel grof verkeersmodel waarmee grote netwerken kunnen worden gesimuleerd. Er moet daarvoor nog veel onderzoek worden gedaan en daar is ook nog heel veel data voor nodig, maar mijn collega's zijn druk bezig zo'n model te bouwen voor de regio Den Haag.

Je kunt verkeer natuurlijk ook veel gedetailleerder beschrijven, met een zogenaamd **microscopisch** verkeersmodel. Elk voertuig in zo'n microscopische simulatie beweegt dan volgens zijn eigen gedragsmodellen vertaald in wiskundige regels. In een microscopisch verkeersmodel wordt het verkeersnetwerk ook heel gedetailleerd gemodelleerd want voertuigen moeten behalve rechtdoor bewegen ook van rijstrook kunnen wisselen, over ingewikkelde kruispunten rijden, enzovoorts, zie Figuur 7.

<sup>vii</sup> Zie bijvoorbeeld Geroliminis, N. and C.F. Daganzo, Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008. 42(9): p. 759-770; of Knoop, V.L., S.P. Hoogendoorn, and J.W.C. Van Lint, Routing Strategies Based on Macroscopic Fundamental Diagram. *Transportation Research Record*, 2012(2315): p. 1-10



Figuur 7 (bron: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/use-cases/multimodal-systems/>)

Dat levert uiteraard een veel rijkere beschrijving op van verkeer dan bij een meta- of macroscopisch beschrijving. En als we het 3D animeren dan lijkt het zelfs heel erg op verkeer! Maar er hangt een stevig methodologisch prijskaartje aan die gedetailleerdere beschrijving. Er zitten in zo'n gedetailleerd model ook veel meer parameters (meer vrijheidsgraden) die allemaal moeten worden geschat op basis van heel veel heel gedetailleerde data, die we in de meeste gevallen helemaal niet hebben—althans nog niet. Hier hebben we een belangrijk wetenschappelijk principe te pakken, dat in de praktijk vaak als paradox wordt ervaren:

*"meer detail en meer potentiële nauwkeurigheid" leidt niet noodzakelijk tot "beter kunnen voorspellen".*

In tegendeel, vaak kun je met simpelere modellen (een omgekeerde fles) betere voorspellingen doen dan met een ingewikkeld model (een micro model), omdat je veel minder aannames maakt. Anders gezegd, meer detail levert vooral meer mogelijkheden op om de mist in te gaan!

## HOE STAAN WE ER VOOR IN ONS VAKGEBIED?

Eerst het goede nieuws: er is een behoorlijke consensus over macroscopische modellen, dwz, gemiddeld voertuig volgedrag onder allerlei omstandigheden. Dat mag ook wel, gezien de lange geschiedenis van dat vakgebied sinds



Greenshields. Dit zijn allemaal beschrijvende theorieën die verkeer kunnen nabootsen (denk aan de omgekeerde fles) maar geen verklaring bieden voor het onderliggende gedrag.

Er is meer discussie over gemiddeld "niet-evenwichtsgedrag". Denk daarbij bijvoorbeeld aan hoe verkeer in en uit files rijdt en hoe verstoringen in een verkeersstroom ontstaan. Datzelfde geldt voor de dynamica op netwerkniveau (het metascopisch niveau): dit is een zeer levendig vakgebied waar op dit moment heel veel gebeurt.

Maar, er is geen enkele overeenstemming binnen de wetenschap over het onderliggende individuele rijgedrag. Sommige van die theorieën zijn beschrijvend, die doen verkeer dus wel na, maar leveren geen verklaring op waarom men rijdt zoals men rijdt. Andere bevatten voorzichtige verklaringen, bijvoorbeeld hoe beleefdheid een rol speelt bij het inhalen, of hoe u in uw hoofd sommen maakt over wanneer u precies een kruispunt gaat oversteken. Maar het fundamentele probleem met al die theorieën is dat we simpelweg de data niet hebben om te toetsen of die hypotheses over het onderlinge gedrag ook echt hout snijden.

Begrijp me dus niet verkeerd: micro-simulatie biedt fantastische mogelijkheden om een aantal grote vraagstukken over mobiliteit te gaan onderzoeken, daar kom ik zo nog op, maar als we willen dat die simulaties echt gedrag voorspellen dan moeten we allereerst op veel en veel grotere schaal microscopische data gaan verzamelen. De volgende vraag is dan natuurlijk: hoe gaan we dat doen?



Figuur 8

Er zijn grofweg drie manieren waarop we data kunnen verzamelen en ik zet ze hier uit langs twee assen (Figuur 8). De verticale as vertelt ons of we met de data ook echt gedrag meten, en de horizontale as vertelt ons in hoeverre we de omstandigheden waaronder de data worden verzameld bekend zijn. Dat is belangrijk want alleen dan kunnen we experimenten herhalen en testen of de uitkomsten echt significant zijn.

De eerste optie is om data in het veld verzamelen, zoals Greenshields dat ook deed. Dat gebeurt op de TU Delft al heel lang, we hebben bijvoorbeeld alle lusgegevens van alle snelwegen in Nederland sinds 2000 in de Regiolab-Delft server op onze afdeling Transport & Planning staan en we hebben nog veel meer heel gedetailleerde data. Natuurlijk representeren deze data echt gedrag, maar de omstandigheden zijn vaak heel lastig te reproduceren. Automobilisten hebben bijvoorbeeld niet op hun dak staan waar ze naar toe gaan, hoe lang ze hun rijbewijs hebben of waarom ze rijden zoals ze rijden.

De tweede optie is om experimenten te doen in een laboratorium. Met voetgangers gaat dat heel erg goed. Mijn collega's hebben hiermee in het afgelopen decennium wereldwijd faam gemaakt. Maar stads- of snelwegverkeer in een lab te stoppen is veel lastiger, ik hoef dat denk ik niet verder uit te leggen. Dan blijft over optie drie: experimenteren in een virtuele omgeving: een computer, een rij simulator, een spel. Dat geeft volledige experimentele controle. Met behulp van een rij simulator kan bijvoorbeeld onderzocht worden hoe automobilisten reageren op nieuwe infrastructuur of hoe ze omgaan met nieuwe gadgets op hun dashboard. Je kunt zelfs met zogenaamde multi-player computerspellen onderzoek doen naar de manier waarop reizigers beslissingen nemen. De foto's in de collage in Figuur 9 zijn gemaakt in Washington DC waar we in 2012 voor het eerst het Everscape experiment uitvoerden. In Everscape worden 30 spelers samen op een eiland gebracht, dat getroffen gaat worden door een aardbeving en vijf minuten daarna door een Tsunami. Zonder dat de deelnemers dit wisten onderzochten we in hoeverre de beslissing om weg te rennen werd beïnvloed door kuddegedrag: rent u direct achter de "avatars" aan vlak bij u in de buurt, of wacht u bijvoorbeeld op meer informatie? We hebben inmiddels een hele serie experimenten achter de rug en deze leveren sowieso een prachtig proefschrift op<sup>viii</sup>!

De grootste vraag met die virtuele experimenten is natuurlijk welk gedrag we nu werkelijk waarnemen en hoe zich dat verhoudt tot echt gedrag? Dat antwoord

<sup>viii</sup> Voor wie niet kan wachten: Mignon van den Berg, Eurico Doirado, Rob van Nes, Hans van Lint, Helmut Prendinger, and Serge Hoogendoorn. Application of a 3D multi-user environment for research on travel choice behavior. The case of a tsunami. 13th Int'l Conf of the Int'l Association for Travel Behaviour Research (IATBR'12), Toronto, Canada, 2012.7

is (uiteraard) heel genuanceerd ... In sommige gevallen lijkt het waargenomen gedrag in een virtuele wereld alleen in termen van "richting" op echt gedrag, bijvoorbeeld acceleratie of deceleratie gedrag, maar niet in termen van de preciese grootte. Dit verschilt voor elk type gedrag en is ook nog eens heel erg afhankelijk van de experimentele opzet. De validiteit van rijnsimulator onderzoek bijvoorbeeld is (nu nog) beperkt.



Figuur 9

Wat ik graag wil is hetzelfde wat alle wetenschappers willen die een grafiekje met twee assen laten zien (Figuur 8). Ik wil naar rechts boven in de grafiek! Echt gedrag waarnemen onder maximale experimentele controle!

En mijns inziens kunnen we in de buurt komen op twee elkaar versterkende manieren. Ten eerste door data uit allerlei bronnen met elkaar te fuseren. Denk aan gegevens uit meetlussen, TomToms, mobieltjes, social media, gegevens van verladere, het weer, grote evenementen, etcetera. Door slimme data fusie is de informatie die we er uit kunnen halen veel meer dan de som der delen. Ik noem het maar even BIG Data fusion. Fuseren van die verschillende data levert de context op die nodig is om echt conclusies te kunnen trekken over het onderliggende rij- en reisgedrag, en dat zijn de twee cruciale ingrediënten om op grote schaal verkeer te kunnen simuleren.

Maar niet alles is te meten, ook niet met BIG Data. Je kunt bijvoorbeeld niet meten hoe iemand gaat reageren op situaties die (gelukkig) maar heel weinig voorkomen (denk aan ongelukken) of op situaties die nog nooit zijn

voorgekomen. Hiervoor zijn experimenten in rijnsimulatoren (of spellen zoals Everscape) hard nodig. Denk eens aan dit voorbeeld: hoe verandert uw rijgedrag als 50% van alle voertuigen om u heen zichzelf rijden en de chauffeurs rustig een krantje lezen?

Onze minister van infrastructuur en milieu toonde lef in 2013 om mee te rijden in het DAVI experiment met zelfrijdende voertuigen dwars door het normale verkeer op de A10 (Figuur 10). Gelukkig werd dit experiment getrokken door o.a. TU Delft en TNO. Maar met drie zelfrijdende voertuigen zitten we nog niet in die toekomst. Ik zou bijvoorbeeld heel graag vooraf willen kunnen simuleren en evalueren wat de effecten van een toenemende hoeveelheid intelligente voertuigen op ons wegennetwerk zijn. Wordt het efficiënter? Wordt het veiliger? Waar ligt het omslag punt, bij 10% zelfrijdende voertuigen? Bij 50%? Voordat we dat met een simulatiemodel kunnen uitrekenen moeten we daarvoor eerst begrijpen hoe automobilisten zonder die technologie zich gedragen—dat gaat vast heel anders zijn dan nu! En er liggen nog veel meer fundamentele vragen over het onderliggende rijgedrag die alleen in een rijnsimulator kunnen worden onderzocht.

En dat betekent dat de validiteit van die virtuele omgevingen stevig omhoog moet. En daar liggen veel kansen die ik graag in de komende jaren zou willen onderzoeken. Ten eerste door experimenten te doen waarin veel mensen tegelijkertijd deelnemen (een multi-player game aanpak): alleen dan nemen we ook echt interactie waar tussen verkeersdeelnemers. Ten tweede is het prima mogelijk om de virtuele infrastructuur en het gedrag van het achtergrondverkeer realistischer te maken. Een mogelijkheid die we heel recentelijk hebben onderzocht is om het achtergrondverkeer een beetje te laten leren van de chauffeurs in de rijnsimulatoren.

### Minister Schultz in zelfrijdende auto

vrijdag 12 nov 2013, 13:11 (update: 22-11-13, 11:43)



Minister van Infrastructuur en Milieu Schultz van  
Rijgen in een zelfrijdende auto

Figuur 10

## ONDERZOEK SPEELTUIN: DELFT INTEGRATED TRAFFIC & TRAVEL LABORATORY

En nu keer ik graag terug naar het idee van die **speeltuin**, waarin onderzoekers en studenten vanuit allerlei achtergronden en disciplines hun tanden kunnen zetten in verkeer en vervoervraagstukken. Want zo'n speeltuin wil ik de komende jaren gaan bouwen. Het idee is om een gezamenlijke onderzoeksomgeving te bouwen waarin data en simulatie modellen aan elkaar gekoppeld worden. De lijm tussen die data en de simulatiemodellen is een geografische beschrijving van de infrastructuur en de bebouwde omgeving, die op een eenduidige manier te vertalen is in netwerken van verschillende schaalniveaus. Het sleutelwoord is "OPEN", en dat komt op twee plekken terug

Ten eerste willen we zoveel mogelijk **open data** in de speeltuin en open standaarden om die data aan netwerken en aan modellen te kunnen hangen. Die standaarden zijn echt cruciaal. Die zorgen ervoor dat onderzoekers zich bezig kunnen houden met onderzoek doen in plaats van met het converteren van dataformaat A naar formaat B. En niet alleen onderzoekers profiteren van uitwisselbaarheid van data en netwerken. Ook advies bureaus en hun opdrachtgevers - overheden - kunnen hun tijd en geld veel beter besteden dan aan het omzetten van data en netwerkbeschrijvingen van formaat A in formaat B.

Ten tweede willen we bouwen aan OpenTraffic<sup>ix</sup> een **open-source multiscale simulatie modellen** initiatief. Open-source betekent dat iedere onderzoeker/programmeur in ons vakgebied kan meedenken en meebouwen aan die simulatie modellen.

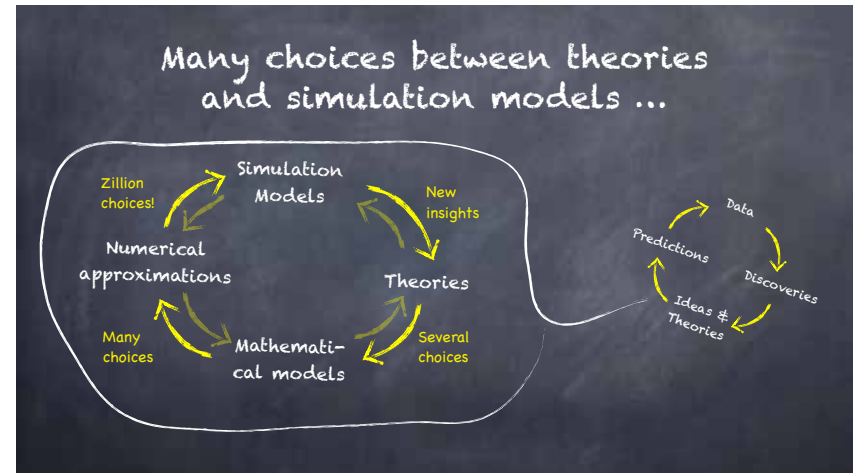
En dat is heel belangrijk.

Er zitten namelijk heel veel stappen tussen een theoretisch idee en een daadwerkelijk simulatiemodel (Figuur 11). Allereerst moet de zaak wiskundig worden uitgewerkt. Die wiskunde moet numeriek worden opgelost, zodat het model uiteindelijk stap voor stap gecodeerd kan worden in software. Bij elk van die stappen worden heel veel keuzes gemaakt en zijn er dus volop mogelijkheden om fouten te maken. Dan is het van cruciaal belang om een stapje terug te kunnen doen, te leren en nieuwe inzichten en technieken te kunnen toepassen.

Open-source ontwikkeling zorgt ervoor dat de wetenschap blijft meedraaien in de ontwikkeling van simulatie gereedschap. Er zijn al een aantal succesvolle

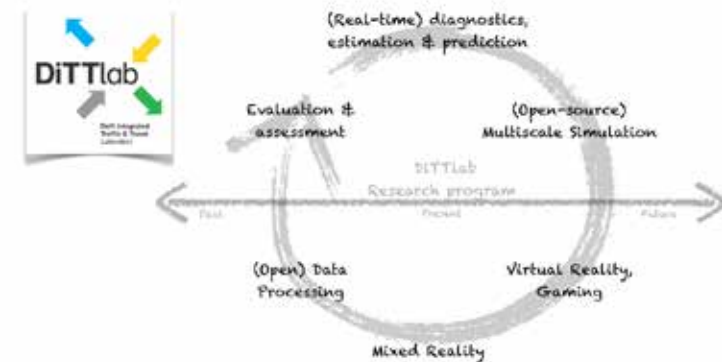
<sup>ix</sup> Zie <http://www.opentrafficsim.org>

open-source initiatieven in ons vakgebied en ik wil met die pioniers goede afspraken maken over de invoer en uitvoer formaten van hun simulatie modellen. En die afspraken hoop ik ook te maken met commerciële simulatie modelbouwers.



Figuur 11

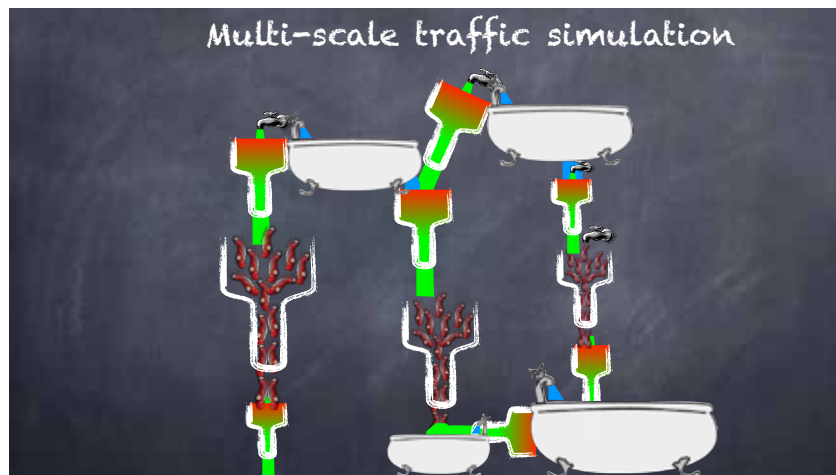
Het onderzoeksprogramma bij mijn leerstoel heeft de naam Delft integrated Traffic & Travel Laboratory (DiTTlab) gekregen. Figuur 12 laat de belangrijkste thema's van dat programma zien.



Figuur 12. De twee uitgaande pijlen in het DiTTlab logo verwijzen naar wat we uit de speeltuin willen halen: kennis (TU blauw) en toepassingen waarmee we mobiliteit efficiënter, betrouwbaarder en groener kunnen maken. De ingaande pijlen representeren datastromen vanuit alle denkbare bronnen. Vanaf januari 2015: [www.dittlab.org](http://www.dittlab.org)

Ik heb de thema's geordenend langs een tijdas. De data die we verzamelen in het veld zeggen uiteraard iets over het verleden en krijgen pas betekenis als ze vertaald worden in informatie, met behulp van geavanceerde data processing en fusie technieken. Met simulatie modellen kunnen we juist iets over de toekomst zeggen, bijvoorbeeld door "what-if" scenario's door te rekenen en verschillende mogelijke toekomsten met elkaar te vergelijken. Ik hoop u overtuigd te hebben dat dit beperkt kan: alleen als het rij en reisgedrag in zo'n model valide is voor de toekomst, en alle data die je erin stopt ook. De enige manier om echt rij- en reisgedrag in die toekomst te meten is door virtueel te experimenteren met rij- en reissimulatoren. En ook daar speelt een al eerder genoemd validiteitsprobleem (meten we echt gedrag?). Door data en modellen te combineren tenslotte, kunnen we ook in het heden reconstrueren waar op dit moment de files staan, wat de onderliggende oorzaken van knelpunten zijn en hoe het verkeer zich gaat ontwikkelen. We kunnen die werkelijkheid dan ook gaan gebruiken als spelomgeving waarin onderzoekers, maar ook verkeersmanagers en planners maatregelen kunnen uitproberen, die in real-time worden doorgerekend. Ik wil nu kort inzoomen op twee thema's die op het bord in Figuur 11 staan.

Het eerste thema luidt (open-source) **multi-scale simulatiemodellen**. Ik heb hierboven beargumenteerd dat we het simulatiemodel moeten kiezen dat past bij het soort van fenomenen dat we willen en kunnen voorspellen op grond van de beschikbare data en de validiteit van onze modellen. Maar het kan nog veel mooier, want je kunt modellen van verschillende schaalniveaus ook letterlijk aan elkaar koppelen. Je krijgt dan ongeveer het bouwwerk in Figuur 13.



Figuur 13

Een belangrijke wetenschappelijke puzzel in zo'n multi-scale model is hoe je ervoor kunt zorgen dat die modellen onderling consistent zijn en dat de informatie goed van het ene naar het andere model stroomt. Je zou kunnen zeggen: we willen voorkomen dat er lekkage ontstaat bij de verbindingen tussen die twee verschillende modellen. Eén van mijn AiOs heeft hiervoor inmiddels een aantal methodes voor bedacht en getest. Haar onderzoek laat bijvoorbeeld zien dat de verbinding van het ene naar het andere model niet noodzakelijk op een vaste plek hoeft te liggen. Door die verbinding afhankelijk van de verkeerscondities te laten bewegen is er in elk geval behoud van voertuigen (één van de weinige dingen waar we echt zeker van zijn).

Die flexibiliteit schept ook de mogelijkheid om dynamisch en wellicht zelfs automatisch te switchen tussen verschillend detailniveaus op basis van de fenomenen die daadwerkelijk plaatsvinden. Dat is mogelijk een oplossing voor een nog veel ingewikkelder puzzel: kun je op grond van wat er gebeurt in het netwerk ook automatisch kiezen voor het juiste schaalniveau?

Het aantal toepassingsmogelijkheden is enorm. We kunnen bijvoorbeeld grote steden of staddelen heel grof modelleren met een metascopisch model. De randwegen erom heen of naar toe modelleren we macro of zelfs microscopisch alnaargelang het vraagstuk. Zonder de noodzaak om een hele stad in een micro (of macro) model te proppen is het dan toch mogelijk om de effecten van bijvoorbeeld een verbrede rondweg op zo'n netwerk door te rekenen. We kiezen het abstractie niveau op grond van de fenomenen die we zichtbaar willen maken. Macro of Meta waar het kan en Micro waar het moet.

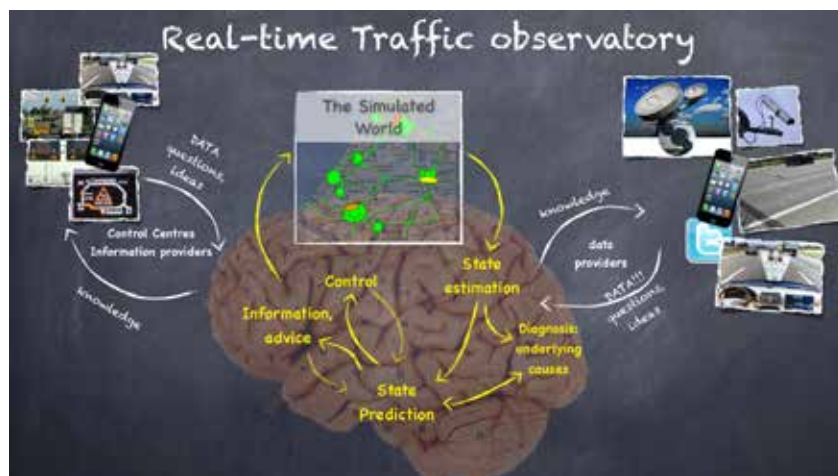
We kunnen hier veel leren van andere disciplines waarin multi-scale aanpakken worden toegepast, denk aan klimaatmodellering, mechanica van materialen en constructies, en kustmorfologie. Multi-scale modelleren is een integrale aanpak waarmee het op grote schaal simuleren van complexe systemen mogelijk wordt.

Tenslotte het onderzoeksthema waar ik de afgelopen 10 jaar zelf het meeste plezier aan heb beleefd, en samen met promovendi en collega's heel kennis en praktische tools heb ontwikkeld: real-time schatten en voorspellen van verkeer\*. Sommige van die tools draaien zelfs al in de praktijk in de PPA (praktijkproef verkeersmanagement in Amsterdam). Maar er zit nog veel meer in het vat ik wil heel graag ook die kennis in de verkeerscentrales krijgen.

\* Al deze promovendi hebben gewerkt aan verschillende puzzels op het gebied van de verkeersvoorspelling en -schatten en voorspellen: Huizhou Tu, Hao Liu, Chris van Hinsbergen, Qing Ou, Thomas Schreiter, Yufei Yuan, Femke van Wageningen-Kessels – hun proefschriften zijn te vinden op <http://library.tudelft.nl>



Figuur 14 schetst een real-time verkeer observatorium waarin al die gereedschappen worden gebruikt. Het idee is weer een speeltuin, waarin echte data wordt gebruikt om real-time een gesimuleerde versie van de werkelijkheid te creëren. Om chocola te maken van die data (gemeten met allerlei sensoren) zijn vervolgens heel veel gereedschappen nodig. De bouwstenen voor al die gereedschappen zijn verkeerstromtheorie + een flinke dosis statistiek en wiskunde. Allereerst om te schatten wat er aan de hand is—vooral op plekken waar we niet meten. Vervolgens moet er een diagnose worden gesteld, is er bijvoorbeeld een capaciteitsprobleem? Op grond daarvan kan dan in de toekomst worden gekeken en kunnen allerlei soorten experimenten worden gedaan. Wat als we dit doen, wat als er dat gebeurt?



Figuur 14

Het Fastlane model waar ik het eerder over heb gehad ontstond aan mijn keukentafel in 2007 in het kader van een klein opdrachtje voor Rijkswaterstaat. Fastlane was daarna het leidend voorwerp in uiteindelijk drie promotie trajecten, die alledrie succesvol werden afgesloten in 2013. Met die kennis kunnen flink wat puzzels worden aangepakt om zo'n observatorium te bouwen. De mogelijkheden zijn eindeloos, maar het aantal resterende puzzels is nog steeds indrukwekkend. Die Fastlane trajecten hebben we samen met de praktijk uitgevoerd: het Havenbedrijf, Rijkswaterstaat en de Rotterdamse verkeersonderneming (een samenwerkingsverband tussen de eerste twee organisaties en de gemeente Rotterdam). Ik hoop dat die partijen opnieuw aanschuiven bij projecten om zo'n verkeersobservatorium te verwezenlijken.

## SAMENWERKING EN ONDERWIJS

Om van een onderzoekstuin zoals DiTTLab een succes te maken is kennis van verkeer en vervoer bij lange na niet genoeg. Bijna alle onderzoeksthema's zijn sterk multi-disciplinair van karakter. Er moet dus ook multi-disciplinair worden samengewerkt. En dat is een uitdaging die ik heel graag aanga.

Die samenwerking begint binnen onze eigen afdeling (transport & planning). Van planning tot operations en alles er tussen in, het begint en eindigt met data. Sinds een paar jaar is ook TU breed de samenwerking op het gebied van transport goed georganiseerd. Binnen het transport instituut, werk ik nu samen met het Systems en Simulation lab op TBM om de eerste prototypes OpenTraffic te bouwen. Pas begonnen is het AMS samenwerkingsverband, waarin de TU Delft met de gemeente Amsterdam, MIT, Wageningen en veel andere partners grootstedelijke problemen willen gaan aanpakken. Ook binnen AMS speelt het chocola maken van heel veel data een centrale rol. Ik heb het plezier om samen met collega's één van de drie eerste projecten te mogen trekken, het Urban Mobility Lab, waarin behalve autoverkeer ook data van alle andere vervoerwijzen aan elkaar gekoppeld gaan worden. De koppeling met DiTTLab is evident.

Ook samenwerking met het bedrijfsleven staat op het programma. Vorig jaar december kwam ik in contact met CGI Nederland. Na een uurtje praten over data en simulatie modellen waren we er eigenlijk wel uit dat we hierin gezamenlijk zouden kunnen optrekken. Deze samenwerking is bijzonder, omdat ze gebaseerd is op een lange termijn visie waarin de belangen van beide partijen prima zijn geborgd. Er zijn nog niet zo heel veel private partijen in ons domein in Nederland die structureel durven te investeren in innovatie en samenwerking met universiteiten. Ik hoop dat we met DiTTLab een vorm gaan vinden waarin die drempel omlaag gaat. Dat is nodig, want die lange termijn support is voor universiteiten van levensbelang. Maar evenzo bieden lange termijn investeringen in onderzoek en onderwijs ongekende kansen voor bedrijven

Tenslotte, als er ergens wordt waargemaakt dat multidisciplinair samenwerken leuk is en resultaten oplevert dan is het binnen transport onderwijs, de interfacultaire opleiding TIL (transport, infra en logistiek) voorop. En dat geldt niet alleen voor de studenten maar ook voor de docenten en de staf. Waar ik dan ook het meest naar uitkijk is om van DiTTLab een speeltuin voor studenten te maken. Ik hoop dat de data en modellen in DiTTLab straks volop gebruikt gaan worden in projecten, vakken en afstudeeropdrachten.

## BEDANKT

Dan ben ik hiermee aan het einde van mijn rede gekomen ... Althans, bijna, want ik wil een aantal mensen heel erg bedanken.

Ik bedank allereerst mijn naaste collega's binnen "mijn leerstoel", en al die andere collega's op de afdeling transport en planning, met wie ik de afgelopen 10 jaar met heel veel plezier heb samengewerkt en dat ook hoop te blijven doen. Datzelfde geldt voor mijn collega's op onze faculteit Civiel, bij het transport instituut en bij de onderzoeksschool TRAIL. Ik dank ook mijn collega's en de onderwijsondersteuning, met wie ik in de afgelopen jaren met heel veel plezier heb samengewerkt als opleidingsdirecteur van de master opleiding Transport Infrastructuur en Logistiek (TIL). En ik dank ook al die TIL studenten die ons het vertrouwen en de motivatie hebben gegeven om die opleiding te blijven verbeteren!



*Figuur 15*

Mja, wie mij in 1997 na het behalen van mijn bul civiele techniek had verteld dat ik nog eens een inaugurele rede zou voeren op de TU Delft had ik voor gek verklaard. Onder het motto "science first, funding later" gaf mijn promotor Henk van Zuylen me 3½ jaar later de kans om uit te vogelen wat ik eigenlijk wilde met mijn leven. Dank daarvoor Henk. Dat was de beste carrière move ooit. Veel dank ook aan mijn andere mentor Serge Hoogendoorn voor de inspiratie en de vriendschap. En heel veel dank ook aan mijn promovendi en studenten, dankzij jullie heb ik een van de leukste banen die er te vinden zijn. In 2013 gebeurden

een aantal fantastische dingen. Maar het was ook een heel zwaar jaar omdat ik tegen grenzen ben aangelopen die ik niet meer kan wegdenken of wegregelen —en dat is wel mijn gebruikelijke en tot nu toe succesvolle aanpak. Ik dank mijn naaste vrienden, mijn lieve schoonfamilie, mijn zusje en familie, en mijn ouders voor de onvoorwaardelijke steun en liefde.

Mijn vader stopte met werken op het scheepsbouwlab aan de TU Delft in 1986. Een van de redenen waren die "klere computers", want "uiteindelijk kwamen de studenten toch naar mij als er weer eens eentje vastliep" en ik zie het inderdaad voor me. Pa had een onfeilbaar indexeersysteem in zijn handgeschreven archief, waarachter en -onder vaag nog de contouren van een reguliere kantoormuimte zichtbaar waren. Pa, ik neem namens de van Lint familie nu revange door een computerlab te starten met hopelijk veel minder vastlopers.

Tenslotte buig ik nederig voor mijn grootste liefde, Christine. De chaos die ik breng in jouw leven zou menig ander te veel worden maar jij blijft staan. Dank je wel daarvoor.

Ik heb gezegd.



**Faculteit Civiele Techniek  
en Geowetenschappen**

Stevinweg 1  
2628 CN Delft

Tel: +31 (0)15 278 9341

[www.tudelft.nl](http://www.tudelft.nl)