



Het is de ergernis van iedere automobilist: knipperende matrixborden en remlichten die in de verte verschijnen, met filevorming en grote vertraging tot gevolg. De scriptie 'Traffic Flow Optimization using Reinforcement Learning' won recentelijk de Ngi-NGN Informatie Scriptieprijs en presenteert een nieuwe oplossing voor dit probleem op basis van technieken uit de informatica, kunstmatige intelligentie en intelligente transportsystemen. De verkregen methode is geïmplementeerd in een navigatie-app en wordt op dit moment in de praktijk getest. De ontwikkelde technologie leidt tot minder filevorming en een betere doorstroming.

Erwin Walraven

WINNAAR
Ngi-NGN
Informatie
Scriptieprijs

Kunstmatige intelligentie

Proactief filevorming verminderen

In de hedendaagse samenleving worden automobilisten dagelijks geconfronteerd met filevorming. Op weg naar huis vanaf het werk ontstaan er regelmatig files op de wegen, met een langere reistijd tot gevolg, maar ook een toegenomen brandstofverbruik en meer uitstoot van uitlaatgassen. De meest voor de hand liggende oplossing voor dit probleem is het uitbreiden van de infrastructuur en het wegennet om de wegcapaciteit te verhogen, maar in de praktijk is dit lang niet altijd haalbaar vanwege hoge kosten en beperkte ruimte om extra rijstroken aan te leggen.

In Nederland zijn er op dit moment twee bekende technieken om verkeer bij te sturen in geval van filevorming. Matrixborden boven de snelweg

kunnen een aangepaste snelheid toekennen aan specifieke rijstroken wanneer er filevorming wordt gedetecteerd door detectoren die zijn geïntegreerd in het wegdek. Het belangrijkste doel van deze verlaagde snelheden is het waarborgen van de veiligheid, om te voorkomen dat automobilisten met hoge snelheid een file binnenrijden en ongevallen veroorzaken door het harde afremmen. De tweede techniek die veel wordt toegepast is toeritdosering, waarbij een verkeerslicht reguleert hoeveel voertuigen toegang krijgen tot een oprit om vervolgens in te voegen op de snelweg. Een nadelige eigenschap van snelheidslimieten op matrixborden en toeritdosering is dat er reactief wordt bijgestuurd nadat een file reeds is ontstaan en de dichtheid van de voertuigen op de weg een

kritieke grens heeft benaderd. Daarnaast kunnen deze systemen storingsgevoelig zijn, wat leidt tot hoge onderhoudskosten, en is het duur om nieuwe installaties aan te leggen. Intelligente transportsystemen zijn een potentiële oplossing voor problemen op het gebied van transport en logistiek, en worden ontwikkeld om verkeer veiliger, betrouwbaarder en milieuvriendelijker te maken.¹ Door de recente ontwikkelingen op het gebied van communicatiesystemen en mobiele netwerken zijn intelligente transportsystemen steeds zichtbaarder in onze samenleving. Hedendaagse navigatiesystemen kunnen bijvoorbeeld alternatieve routes kiezen op basis van de gemeten drukte op de weg. En commerciële postbedrijven gebruiken vergelijkbare

technologie om de locaties van hun voertuigen realtime te monitoren om hiermee hun afleverproces te optimaliseren en kosten te verminderen. Intelligente transportsystemen hebben de potentie om het fileprobleem te lijf te gaan, maar het grote gat tussen wetenschappelijk onderzoek op het gebied van verkeer en de kunstmatige intelligentie, bemoeilijkt het introduceren van concrete toepassingen die bruikbaar zijn voor alle automobilisten. Het voorspellen van verkeersdrukte en het berekenen van de juiste snelheidslimieten om proactief verkeer te reguleren, is hierbij een grote uitdaging.

Snelheidslimieten berekenen

Een belangrijk vraagstuk is welke snelheidslimie-



Bij matrixborden en toeritdosering wordt reactief bijgestuurd nadat een file reeds is ontstaan.



ten geschikt zijn bij gedetecteerde of voorspelde filevorming stroomopwaarts. **Figuur 1** toont een schematische weergave van dit probleem rond de oprit van een snelweg, waarbij de pijlen de richting van de voertuigstroom aanduiden. Het grijze gebied represeneert filevorming en het aangrenzende deel van de snelweg is verdeeld in drie wegsegmenten waarvoor snelheidslimieten berekend moeten worden. Een oplossing voor dit probleem is niet vanzelfsprekend omdat het aanvankelijk niet bekend is waar en wanneer snelheidslimieten moeten worden opgelegd, en het is tevens onbekend welke snelheidslimiet geschikt is voor de verkeersintensiteit in het congestiegebied.

Om de juiste snelheidslimiet te kunnen berekenen voor een bepaalde verkeersintensiteit wordt gebruikgemaakt van een macroscopisch verkeersmodel dat bekend staat onder de naam METANET.² Dit model verdeelt een snelweg in

Het vinden van de juiste snelheidslimieten wordt beschouwd als een wiskundig optimalisatieprobleem

wegsegmenten – vergelijkbaar met de verdeling in figuur 1 – en kan gebruikt worden om snelheid, dichtheid en flow te berekenen voor ieder wegsegment gedurende de tijd. Dit model maakt het mogelijk om geautomatiseerd verkeer te simuleren en te redeneren over de invloed van snelheidsbeperkingen op de filevorming en bijbehorende vertraging.

De extra reistijd als gevolg van filevorming kan worden beschreven als het aantal voertuigverliesuren. Dit is het aantal uren verlies aan reistijd vergeleken met de afwikkeling van het verkeer zonder filevorming. Wanneer er op een traject één uur verlies heeft plaatsgevonden, dan kan dit bijvoorbeeld betekenen dat zestig voertuigen een vertraging van één minuut hebben opgelopen. Het vinden van de juiste snelheidslimieten wordt beschouwd als een wiskundig optimalisatieprobleem waarbij de vertraging voor automobilisten, uitgedrukt in voertuigverliesuren, geminimaliseerd dient te worden.

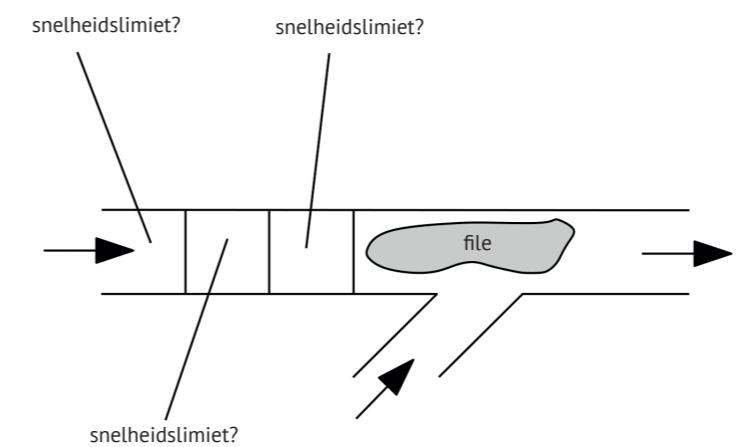
De voorgestelde methode formuleert het optimalisatieprobleem als een wiskundig beslissingsproces dat bekend staat onder de naam Markov Decision Process.³ Binnen dit beslissingsproces moet voor iedere verkeerstoestand een bijbehorende snelheidslimiet berekend worden. Daarnaast kan het Markov Decision Process-model gebruikt worden om snelheidslimieten te vinden bij voorspelde drukte op de weg. Een schematische weergave wordt getoond in **figuur 2**, waarbij een verkeerstoestand en voorspelling wordt vertaald naar snelheidslimieten die kunnen worden toegekend aan segmenten van de snelweg.

De vertaling van de huidige verkeerstoestand en een verkeersvoorspelling naar snelheidslimieten wordt verkregen door een zelflerend systeem dat door interactie met het verkeersmodel zelfstandig leert welke snelheidslimieten geschikt zijn om de doorstroming te bevorderen. Hierbij worden methodes gebruikt uit de kunstmatige intelligentie, zoals reinforcement learning⁴ en neurale netwerken die gebaseerd zijn op het functioneren van de hersenen van de mens.⁵ De resulterende vertaling van verkeerstoestand en verkeersvoorspelling naar snelheidslimieten wordt een policy genoemd, en kan worden gebruikt om in iedere situatie de juiste snelheidslimieten te bepalen.

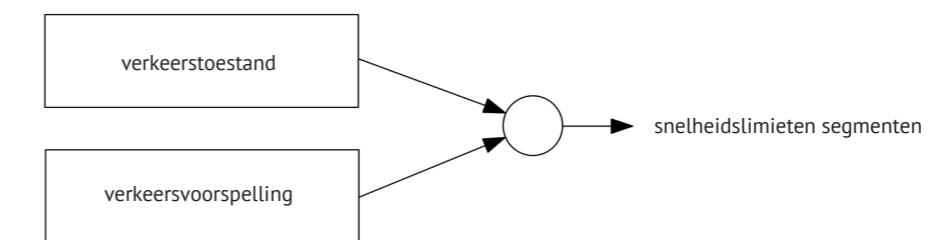
Experimenten

Gedurende het uitgevoerde onderzoek zijn er experimenten en simulaties uitgevoerd om het effect te meten van de snelheidslimieten op de filevorming en de vertraging die wordt ondervonden door automobilisten. Deze simulaties zijn gebaseerd op de verkeersdruk die gedurende een ochtendspits in oktober 2013 werd gemeten op de A2 en A67 bij Eindhoven. Deze data is afkomstig uit de Nationale Databank Wegverkeersgegevens en werd gemeten door detectors die zijn geïntegreerd in het wegdek. Op basis van de uitgevoerde simulaties kan worden geconcludeerd dat als slechts 20 procent van de automobilisten zich aan de geadviseerde snelheid houdt, er al een significante winst waarneembaar is.

De methode voor het vinden van snelheidslimieten is gebaseerd op de aannname dat detectors in het wegdek goed functioneren en dat de metingen van het aantal passerende voertuigen accuraat zijn. In experimenten is vastgesteld dat de voorgestelde methode bestand is tegen onnauwkeurige metingen met afwijkingen tot 15 procent. De berekende snelheidslimieten zullen dus ook



Figuur 1. Schematische weergave van een snelweg met file bij de oprit



Figuur 2. Snelheidslimieten voor segmenten op basis van huidige verkeerstoestand en -voorspelling

zinvol zijn wanneer de snelheid en dichtheid op bepaalde delen van de weg niet nauwkeurig vastgesteld kunnen worden. Een andere richting van onderzoek omvat het hergebruiken van bestaande kennis, in de vorm van policies, om snelheidslimieten voor andere snelwegen efficiënter te kunnen berekenen, waardoor het zelflerende systeem minder rekentijd nodig heeft om de juiste snelheidslimieten te vinden. Deze methode heet transfer learning en kan worden toegepast om eerder berekende resultaten her te gebruiken in nieuwe berekeningen.⁶

Smoover

De ontwikkelde methode voor het bepalen van snelheidslimieten is in de praktijk gebracht bij de ontwikkeling van Smoover, een nieuwe navigatie-app die is ontwikkeld binnen het Brabant in-car III-programma. Smoover kan gebruikt worden als standaard navigatiesysteem om te navigeren naar een bestemming binnen Nederland, maar geeft naast de reguliere navigatieinstructies ook mel-

De vertaling van de huidige verkeerstoestand en een verkeersvoorspelling naar snelheidslimieten wordt verkregen door een zelflerend systeem



dingen met daarin snelheidsadviezen om filevorming tegen te gaan. De snelheidsadviezen hebben als doelstelling om automobilisten iets langzamer te laten rijden voordat files zijn ontstaan, om op die manier te helpen om filevorming te voorkomen.

De systemen achter Smoover gebruiken methodes uit de kunstmatige intelligentie om verkeersvoorspellingen te maken op basis van bijvoorbeeld historische data, actueel verkeersaanbod, evenementen, ongevallen en voorspellingen van het weer. De verkeersvoorspellingen worden gecombineerd met de huidige verkeersdrukte die wordt gemeten door de detectoren in het wegdek, om vervolgens geschikte snelheidsadviezen te kunnen bepalen die naar de Smoover-apps in rijdende auto's worden gestuurd. Er worden ook meldingen gegeven om automobilisten te waarschuwen voor korte invoegstroken en de minimale afstand tot voorliggers.

De systemen achter Smoover gebruiken methodes uit de kunstmatige intelligentie om verkeersvoorspellingen te maken

Het ministerie van Infrastructuur en Milieu, de provincie Noord-Brabant en het Samenwerkingsverband Regio Eindhoven hebben op de A67 een praktijkproef geïnitieerd om te experimenteren met in-car-technologie in de praktijk. Automobilisten in deze regio zijn aangemoedigd om deze intelligente transportsystemen te gebruiken tijdens het rijden, en hebben samen inmiddels meer dan honderdvijftigduizend km afgelegd met Smoover als navigatiesysteem. Dit laat zien dat wetenschappelijk onderzoek op het gebied van informatica en kunstmatige intelligentie toegepast kan worden om maatschappelijk relevante problemen aan te pakken in de praktijk.

Toekomstige ontwikkelingen en uitdagingen

Het onderzoek in de scriptie ‘Traffic Flow Optimization using Reinforcement Learning’⁷ en de praktische toepassing in de vorm van de navigatie-app

is de eerste stap in een langer proces op weg naar autonoom autorijden. Auto's zullen in de toekomst zelfstandig op een intelligente manier bepalen welke snelheidslimieten geschikt zijn om samen op een coöperatieve manier filevorming tegen te gaan. Dit biedt de mogelijkheid om gepersonaliseerde snelheidslimieten toe te kennen aan specifieke voertuigen, zodat bijvoorbeeld een vrachtwagen op de rechterrijstrook een andere maximumsnellheid heeft dan een nadere personenauto. De maximumsnellheid kan bijvoorbeeld worden getoond op een display in het dashboard, ter vervanging van de algemeen geldende borden naast de weg en de matrixborden boven de weg. De verwachting is dat auto's verder in de toekomst volledig autonoom kunnen rijden. Automatische bepaling van maximumsnellheden is ook bij deze ontwikkeling van groot belang, zodat auto's in de toekomst dichter op elkaar kunnen rijden om de beschikbare wegcapaciteit beter te benutten.

Naast het optimaliseren van het verkeer met gepersonaliseerde snelheidsadviezen zijn er diverse andere problemen die een uitdaging vormen op het gebied van transport, energie en kunstmatige intelligentie. In plaats van het aanpassen van de snelheid van de weggebruikers, kunnen er ook alternatieve routes of vertrektijden worden voorgesteld om de drukte op specifieke plaatsen van het verkeersnet te verminderen. Dit vereist intelligente algoritmen om routes te plannen, waarbij voorspellingen van reistijd en voorspelingen van filevorming gebruikt worden om routes voor meerdere automobilisten te berekenen. Dit zou, net als de gepersonaliseerde snelheidsadviezen, geïntegreerd kunnen worden in hedendaagse navigatiesystemen of navigatie-apps.

Elektrisch autorijden is een andere ontwikkeling die een grote rol zal spelen in de toekomst. De elektrische auto verschijnt steeds vaker in het straatbeeld en helpt mee om de uitstoot van uitlaatgassen te verminderen. Hoewel het rijden in een elektrische auto beter is voor het milieu, zal dit in de toekomst tot grote problemen gaan leiden voor de lokale elektriciteitsnetwerken in wijken en steden. Als iedereen bij thuiskomst uit het werk de auto aansluit op het netwerk om op te laden, kan dit tot overbelasting en instabiliteit van het netwerk leiden, met grote problemen tot gevolg. Andere toekomstige veroorzakers van overbelasting en capaciteitsproblemen zijn de zonnepanelen die steeds vaker op daken van



De navigatie-app Smoover toont een notificatie met een snelheidsadvies van 70 km/u.

In plaats van het aanpassen van de snelheid van de weggebruikers, kunnen er ook alternatieve routes of vertrektijden worden voorgesteld

huizen worden geïnstalleerd en hun opgewekte stroom gezamenlijk terugleveren aan het netwerk. In plaats van het uitbreiden van de netwerkcapaciteit wordt er onderzocht hoe het opladen van elektrische auto's op een intelligente manier centraal gecoördineerd kan worden, in een zogenoemde slim energienetwerk. Hierbij zal het netwerk zelf bepalen welke elektrische auto's mogen opladen, zodat alle auto's de volgende werkdag voldoende zijn opgeladen om naar het werk te rijden en weer terug naar huis. Dit thema is een startpunt voor toekomstig onderzoek, en ook hierin zal kunstmatige intelligentie een belangrijke rol vervullen.

Ir. Erwin Walraven (e.m.p.walraven@tudelft.nl) is promovendus in de onderzoeks groep Algoritmiek van de TU Delft. In november ontving hij de Ngi-NGN Informatie Scriptieprijs 2014.

Literatuur

- [1] Figueiredo, I., J. Jesus, J. Machado, J. Ferreira & J. Martins de Carvalho (2001). Towards the Development of Intelligent Transportation Systems. *Intelligent Transportation Systems*, Vol. 88, 1206-1211.
- [2] Messner, A. & M. Papageorgiou (1990). METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering & Control* 31, 8-9, 466-470.
- [3] Puterman, M.L. (1994). *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Watkins, C.J.C.H. (1989). Learning from Delayed Rewards. PhD thesis. Cambridge, King's College.
- [5] Haykin, S. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall PTR.
- [6] Fernández, F. & M.M. Veloso (2006). Probabilistic policy reuse in a reinforcement learning agent. *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 720-727.
- [7] Walraven, E. (2014). *Traffic Flow Optimization using Reinforcement Learning*. MSc thesis. Delft University of Technology.