



verkeerskunde

www.verkeerskunde.nl/milieuvriendelijkverkeersmanagement

Een samenvatting van dit artikel is gepubliceerd in Verkeerskunde 7/2009 (p.47)

Milieuvriendelijk verkeersmanagement

*Hans Hellendoorn, Solomon Kidane Zegeye en Bart De Schutter, TU Delft
Ewald Breunesse, Shell Nederland BV*

Inleiding

De dreigende klimaatverandering en de gevolgen daarvan oefenen grote druk uit op de maatschappij om zuiniger met brandstof om te gaan en vooral de uitstoot van schadelijke stoffen te verminderen. Dit kan op vele manieren: door gebruik te maken van zonne- en windenergie, door gebouwen beter te isoleren, door energiezuinigere aandrijvingen in te zetten, maar ook door over te gaan op een nieuwe rijstijl. De overheid heeft veel reclame gemaakt voor dit zogenaamde nieuwe rijden, waarbij men vroeger naar een hogere versnelling schakelt, de auto vaker laat uitrollen, zover mogelijk vooruitkijkt en indien mogelijk de motor uitschakelt. Deze vorm van autorijden bespaart brandstof, maar met collectieve maatregelen is het ongetwijfeld mogelijk nog meer brandstof te besparen en daarmee de schadelijke uitstoot verder te beperken. Het lijkt evident dat minder opstoppingen en een regelmatigere verkeersverloop brandstof kunnen besparen. Het is alleen de vraag tegen welke prijs dat gebeurt in de vorm van langere reistijden en hoe men een goede rijstrategie kan bepalen.

Er zijn verschillende schadelijke stoffen die vrijkomen in het verkeer, o.a. stikstof, koolmonoxide en -dioxide, koolwaterstof en fijnstofdeeltjes. Stikstof (NO_2 of algemener NO_x) reageert onder invloed van zonlicht met organische stoffen, waarbij ozon vrijkomt, een stof die bij inademing slecht is voor de gezondheid en ook slecht is voor de landbouw. Stikstof kan ook reageren met zwavel, waarbij chemische verbindingen met lage pH-waarden ontstaan die als zure regen of mist gebouwen beschadigen en vissterfte veroorzaken. Als stikstof met ammoniak en andere stoffen reageert, kunnen fijnstofdeeltjes ontstaan die het longweefsel beschadigen. In benzine zitten additieven die eveneens fijnstof veroorzaken. Een andere stof die vrijkomt in verbrandingsmotoren is koolstofmonoxide (CO), een kleurloos en reukloos gas dat ontstaat bij onvolledige verbranding. Autorijden is de veroorzaker van ruim de helft van de wereldwijde CO-emissie, in de stad kan dat oplopen tot ca. 90%. CO neemt zuurstof weg en is schadelijk voor het hart. Andere schadelijke stoffen zijn koolwaterstoffen (HC), zoals methaan, ethaan, propaan, enz. Zij zorgen voor irritatie van de slijmvliezen en veroorzaken hoofdpijn. Verder komt er in het verkeer veel koolstofdioxide (CO_2) vrij, dat niet direct schadelijk is voor de gezondheid, maar erg slecht voor het milieu. Koolstofdioxide draagt

in belangrijke mate bij aan de aardopwarming en daarmee samenhangend aan klimaatverandering en zeespiegelstijging.

De uitstoot van stikstoffen, fijnstofdeeltjes, koolwaterstoffen en koolmonoxide kan op termijn met technische middelen zoals katalysatoren, vollediger verbranding en roet- en fijnstoffilters worden gereduceerd. Bovendien wordt er in benzine steeds minder gebruik gemaakt van aromaten zoals benzeen, waardoor de gezondheidsproblemen ook kleiner worden.

Met CO₂ is dat anders. Benzine is een mengsel van aromaten zoals benzeen en toluen, van alkanen zoals propaan, butaan en vooral heptaan, en van naftenen of cycloalkanen. Gemiddeld bestaan moleculen in benzine uit C₆H₇, grote koolwaterstofmoleculen dus. Dat zorgt ervoor dat als benzine verbrandt, ofwel reageert met zuurstof (O₂), er uit één liter benzine naast water circa tweeëneenhalve kilo CO₂ ontstaat. Daarmee is CO₂ op de langere termijn het grootste milieuprobleem dat door het autorijden veroorzaakt wordt. Kooldioxide is inherent aan het verbrandingsproces en ontstaat in zulke grote hoeveelheden, dat afvangen of filteren in auto's onmogelijk is. Omdat brandstofverbruik en CO₂-productie samenhangen, is milieuvriendelijk rijden vooral zuinig rijden.

Om het verkeer milieuvriendelijker te laten rijden zijn collectieve maatregelen nodig. Verkeerskundigen maken gebruik van een groot aantal verkeersmaatregelen, zoals verkeersregelininstallaties, toeritdoseringen, snelheidslimieten en routekeuzeborden (DRIPs). Tot nu toe werden deze meestal gebruikt om de 'Total Time Spent' (TTS, de totale reistijd van alle voertuigen) te reduceren, of de verkeersstroom te bevorderen, niet om de uitstoot van CO₂ te reduceren. Het is waarschijnlijk dat een betere doorstroming goed is voor het milieu, maar dat geldt niet in alle gevallen. Evenzo lijkt een lage TTS goed voor het milieu, maar zoals bekend is het benzineverbruik bij hoge snelheden veel hoger dan bij lage snelheden. Een grote gelijkmatige verkeersstroom met snelheden van bijvoorbeeld 200km/h en een fantastische TTS is dus zeer slecht voor het milieu.

Een goede methode om het verkeer te regelen en tegelijk ver vooruit te kijken is Model Predictive Control (MPC). Daarbij zijn verschillende verkeersmodellen mogelijk, dit artikel maakt gebruik van een microscopisch verkeersmodel en een emissiemodel met gemiddelde snelheden per tijdsinterval. Een emissiemodel dat elke auto apart volgt en continu het individuele brandstofverbruik meet is technisch mogelijk, maar verlangt veel simulatietijd, vooral bij MPC. In de case study wordt als verkeersmaatregel dynamische snelheidsbeperking gebruikt, de borden die boven de snelweg hangen, andere maatregelen zijn ook mogelijk. We vergelijken diverse strategieën wat betreft hun invloed op de TTS en de uitstoot (TE, Total Emissions).

Verkeersmodellen

In de verkeerskunde maakt men gebruik van macroscopische, mesoscopische en microscopische modellen. Macroscopische modellen zijn gebaseerd op gaskinetische processen en maken gebruik van de gemiddelde verkeerssnelheid, de gemiddelde dichtheid en de gemiddelde verkeersstroom. Microscopische modellen beschrijven het gedrag van individuele voertuigen in de verkeersstroom en zijn gebaseerd op de positie, de snelheid en de versnelling van elk afzonderlijk voertuig. Mesoscopische modellen combineren het individuele gedrag van elk voertuig met macroscopische variabelen zoals verkeersstroom en -snelheid op een bepaald traject. Omdat wij geïnteresseerd zijn in de totale emissie maken we gebruik van microscopische modellen die per voertuig de emissie meten. Het microscopische model is gebaseerd op een voertuigvolgmodel,

waarbij uitsluitend wordt gekeken naar de longitudinale component, het gedrag per rijstrook. Het model is uitbreidbaar naar complexere modellen waarin ook de wisseling van rijstroken een rol speelt.

Afhankelijk van de verkeersdruk kan een voertuig zich in twee modi bevinden. Als de vrije ruimte voor een voertuig groot is (bijv. meer dan 50m), bevindt het zich in een vrijestroommodus; als de vrije ruimte klein is, bevindt het zich in een voertuigvolgmodus. In de vrije-stroommodus is de versnelling van het voertuig gebaseerd op het verschil tussen de gewenste snelheid of de snelheidslimiet en de actuele snelheid. In de voertuigvolgmodus is de versnelling gebaseerd op de versnelling van voertuigen die zich verder stroomafwaarts bevinden. Brackstone & McDonald [3] hebben een overzicht van voertuigvolgmodellen opgesteld, wij maken gebruik van het Gazis-Herman-Rothery stimuli-respons voertuigvolgmodel [4] dat gebaseerd is op de reactiesnelheid van de bestuurder, de variatie in de huidige snelheid en de positie van de voorganger.

Emissiemodellen

De uitstoot van voertuigen hangt af van een groot aantal factoren, voertuigtypische (zoals de motor, het chassis, de leeftijd en het onderhoud), omgevingsfactoren (zoals de infrastructuur en het weer), en operationele factoren (zoals de snelheid, de versnelling en de belading). Deze laatste factoren zijn het meest bepalend voor het brandstofverbruik en daarmee samenhangend de emissie van schadelijke stoffen.

Men onderscheidt twee soorten emissiemodellen, technologiegebaseerde modellen en verkeersmodellen. Technologiegebaseerde modellen maken gebruik van gedetailleerde kennis van de voertuigdynamica en de motorkarakteristiek. Deze modellen zijn kwalitatief uitstekend, maar zeer rekenintensief en daardoor ongeschikt voor online modelgebaseerde rekenmethoden.

Emissiemodellen die gebaseerd zijn op de verkeersstroom zijn eenvoudiger in het gebruik. Deze modellen gaan uit van de gemiddelde snelheid van ieder voertuig tijdens de reis en berekenen uit deze snelheid met formules diverse emissies. In de praktijk is het gebruikelijk een dynamischere versie te gebruiken, die gebaseerd is op gemiddelde snelheden op deeltrajecten of actuele snelheden op ieder tijdstip. Deze laatste methode gaat dan impliciet uit van de versnelling op ieder tijdstip en genereert een redelijk precieze emissie voor ieder voertuig.

In deze studie maken we gebruik van een dergelijk emissiemodel uit COPERT III [2]. De wiskundige vergelijkingen voor CO-, NO_x- en HC-emissies die uit dit model volgen zijn:

$$E_{\text{CO}}(v) = (0.018v^2 - 0.256v + 10.08) \text{ [g/km]}$$

$$E_{\text{NO}_x}(v) = 10^{-4}(0.50876v^2 - 90v + 5422) \text{ [g/km]}$$

$$E_{\text{HC}}(v) = 10^{-4}(0.892616v^2 - 87v + 4486) \text{ [g/km]}$$

waarbij v de gemiddelde snelheid van een voertuig op een voorgegeven traject is en E_{CO} , E_{NO_x} en E_{HC} voor de emissieniveaus van koolstofmonoxide, stikstofoxides en koolwaterstoffen staan. Fig. 1a toont het model voor de CO-, NO_x- en HC-emissies in relatie tot de rijnsnelheid.

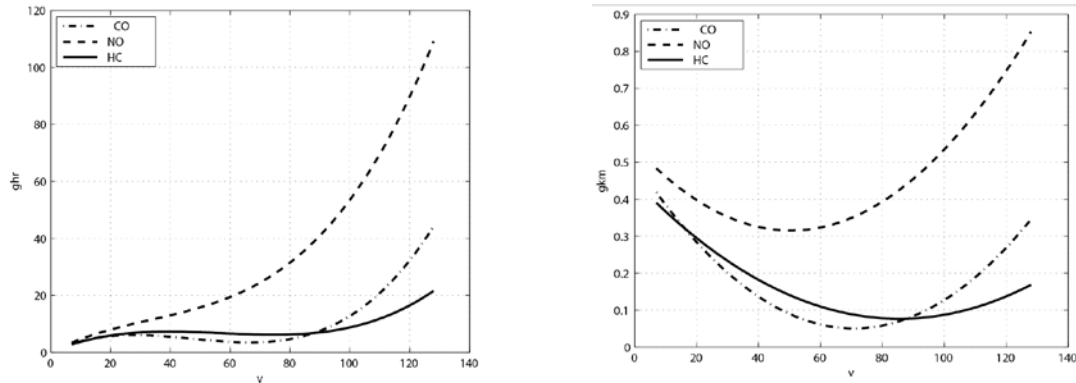


Fig. 1. Links (a) de emissiewaarden in g/km, rechts (b) de emissiewaarden in g/h

Deze waarden zijn gegeven in g/km terwijl het eenvoudiger is gebruik te maken van emissies in gram per uur (g/h). We vermenigvuldigen daarom de bovenstaande vergelijkingen met de gemiddelde snelheid van ieder voertuig. Figuur 1b geeft het verband tussen emissies en gemiddelde snelheden weer. Tijdens de simulatie worden de emissiewaarden gegenereerd door op iedere tijdstap de actuele snelheid in het model in te voeren. Op deze wijze kennen we de emissie per seconde van ieder voertuig in het netwerk.

Dit model is slechts gebaseerd op de gemiddelde snelheid van een voertuig. Het zou beter zijn ook de versnelling mee te nemen, omdat die grote invloed heeft op de schadelijke uitstoot. Ahn et al. [1] hebben een model ontwikkeld dat de versnelling a van ieder voertuig expliciet meeneemt. In hun artikel staan tabellen hoe zwaar combinaties van snelheden en versnellingen in emissieberekeningen meegenomen moeten worden.

Model Predictive Control (MPC)

Model Predictive Control is vergelijkbaar met schaken. Een schaker heeft kennis van het spel en van het gedrag van de tegenstander, hij heeft zegge een model van het spel. Een schaker denkt enkele zetten vooruit en berekent hoe de tegenstander daarop zal reageren. Als hij een groot aantal mogelijke combinaties in zijn hoofd heeft onderzocht kiest hij de meest kansrijke zet. Na de tegenzet van de tegenstander begint het vooruitdenken en berekenen opnieuw.

MPC is een regelmethode die gebruik maakt van een model van het aan te sturen proces en een realtime optimaliseringsprogramma. Op basis van metingen in het proces en een voorspelling van de toekomst bedenkt het systeem een groot aantal reeksen met te nemen maatregelen, zoals een schaker diverse series zetten vooruitdenkt. De lengte van een reeks duiden we aan met N_c , de control horizon. Van iedere reeks maatregelen wordt de kwaliteit over een zogenaamde prediction horizon gemeten ($N_p > N_c$). Het optimaliseringsprogramma bepaalt in welke richting de reeksen maatregelen gezocht worden. Er is een doelfunctie $J(k)$ die voor elke tijdstap k de kwaliteit van een reeks maatregelen kan meten. Van de reeks met de beste kwaliteit wordt alleen de eerste stap uitgevoerd, daarna herhaalt het proces zich opnieuw tot het einde van de simulatieperiode.

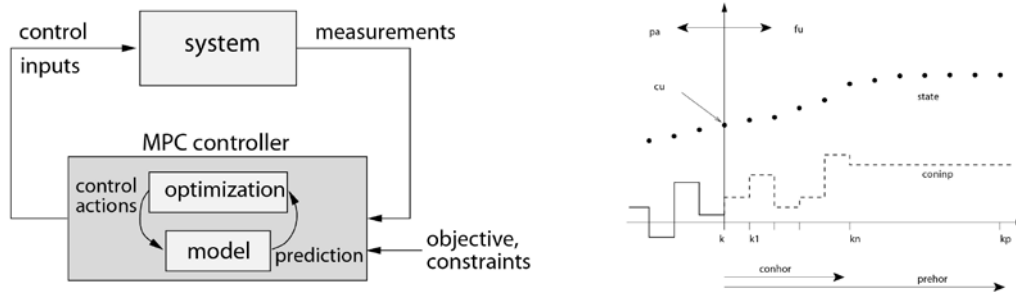


Fig. 2. De werking van de MPC, links (a) schematisch, rechts (b) de prediction en control horizon

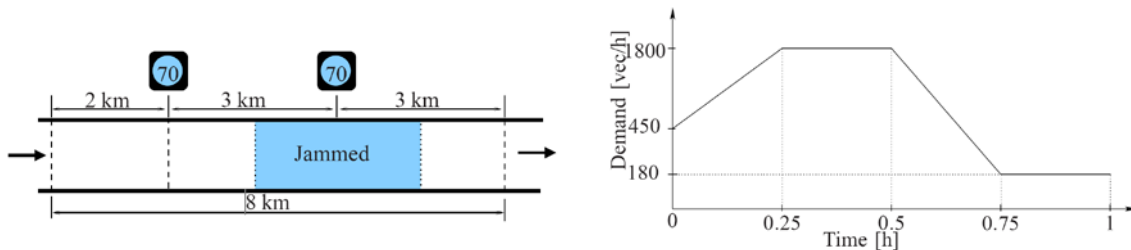
Fig. 2a toont de werking van het verkeerssysteem en de MPC-controller. We beschouwen beide systemen in discrete tijd, een typische tijdstap is 1 minuut. In iedere tijdstap berekenen we de toestand van het verkeerssysteem met variabelen zoals plaats, snelheid en versnelling. De MPC controller bestaat uit een model van het verkeerssysteem, elke reeks van opeenvolgende maatregelen die door het optimaliseringsprogramma wordt voorgesteld, wordt in dit model ingevoerd en geëvalueerd. In Fig. 2b is de werking van MPC schematisch weergegeven voor een systeem met snelheidslimieten in een verkeersstroom. Vanuit een toestand op tijdstip k berekent het systeem een reeks snelheidslimieten tot op tijdstip $k + N_c - 1$, en bepaalt het de kwaliteit van de maatregelen tot op tijdstip $k + N_p$.

Voor het bepalen van de kwaliteit van een serie maatregelen is zoals gezegd een doelfunctie nodig. Een probleem is dat de minimale uitstoot van diverse schadelijke stoffen bereikt wordt bij verschillende snelheden. Dit maakt het onmogelijk om een optimale snelheid te bepalen die in ieder opzicht goed is voor het milieu. Als we de totale uitstoot willen verlagen zal dat meer invloed hebben op de ene stof dan op de andere. In de toekomst zal men zich vooral op CO₂-reductie richten, bij huidige voertuigen gaat het vooral om NO_x, CO en HC. In een WHO-rapport [6] is aangetoond dat NO_x slechter voor de gezondheid is dan andere stoffen, daarentegen zijn op de lange termijn stoffen als koolmonoxide schadelijker voor de gezondheid. We maken daarom in de doelfunctie gebruik van gewichten om de schadelijke uitstoot per stof te kunnen beoordelen. Daarnaast bevat de doelfunctie de verblijfstijd van automobilisten in het netwerk en de mate waarin verschillende maatregelen elkaar opvolgen. Het is namelijk wenselijk dat de snelheidsaanduiding op de borden niet te vaak wisselt.

De gewichten in de doelfunctie functioneren alleen als de onderliggende variabelen (uitstoot, reistijd, consistentie) genormaliseerd zijn. Ieder aspect krijgt dan een waarde rond 1. Stel dat er een serie maatregelen berekend is tot aan de control horizon N_c en dat we het gedrag van het systeem kunnen beoordelen tot aan de prediction horizon N_p . Omdat we geïnteresseerd zijn in genormaliseerde waarden berekenen we voor het traject dat bepaald wordt door N_c en N_p de nominale totale reistijd en de nominale emissies als we aannemen dat er geen verkeersmaatregelen zijn en het verkeer met een vaste voorgedefinieerde snelheid rijdt. Verder berekenen we het maximale aantal maatregelen dat binnen de control horizon N_c mogelijk is. De actuele verblijfstijden en emissies delen we door de nominale waarden, zodat ze onderling vergelijkbaar zijn. Per serie maatregelen beginnend bij control tijdstap k krijgen we nu een doelfunctie:

$$J(k) = \lambda_1 \frac{\text{totale verblijfstijd}}{\text{nominale verblijfstijd}} + \lambda_2 \frac{\text{aantal maatregelen}}{\text{maximum aantal maatregelen}} + \lambda_3 \frac{\text{CO-emissie}}{\text{nominale CO-emissie}} + \lambda_4 \frac{\text{NO}_x\text{-emissie}}{\text{nominale NO}_x\text{-emissie}} + \lambda_5 \frac{\text{HC-emissie}}{\text{nominale HC-emissie}}$$

De λ 's zijn gewichten die door de wegbeheerder of de politiek bepaald kunnen worden. De bovenstaande tellers zijn eenvoudig wiskundig te definiëren [7].



Figuur 3. Links (a) de layout van het weggedeelte, rechts (b) de verkeersvraag

Voorbeeld

Om bovenstaande methode te illustreren nemen we een eenvoudig voorbeeld, een weggedeelte van 8 km lang met één rijstrook. Fig. 3a laat zien dat het weggedeelte is opgesplitst in drie secties en dat er twee variabele snelheidssignaleringen zijn. We veronderstellen dat we het verkeer gedurende één uur simuleren. Bij de start van de simulatie is er een file op het weggedeelte van 3.5 km tot 6.5 km. De verkeersvraag over de tijd is gegeven in Fig. 3b en is voor alle experimenten gelijk. De parameters die gebruikt worden voor de simulatie zijn gegeven in Tabel 1.

MPC Parameters	Waarde	Uitleg
T_{sim}	60min	Simulatietijd
N_p	10min	Prediction horizon
N_c	2min	Control horizon
t_c	1min	Control tijdstap
t_s	1s	Simulatie tijdstap
V_{max}	120km/h	Maximum snelheid
V_{min}	40km/h	Minimum snelheid

TABEL 1. MPC controller parameters

Om de doelfunctie te kunnen gebruiken hebben we nominale waarden nodig. De nominale waarden voor de totale verblijfstijd TTS en de CO-, NO_x- en HC-emissies berekenen we voor het bovenstaande scenario bij een vaste snelheidslimiet van 80 km/h. Het maximale aantal maatregelen is gelijk aan N_c , het aantal stappen dat men vooruit denkt.

Voor het oplossen van het MPC optimalisatieprobleem maken we gebruik van sequential quadratic programming [5], we hebben daarbij gebruik gemaakt van de functie `fmincon` uit Matlab. Uit de simulaties komen als uitgangen twee belangrijke parameters: de totale verblijfstijd van alle voertuigen (TTS) en de emissiewaarden (TE), waarbij TE de totale

emissie van een mix van CO, NO_x en HC is. De simulatietijd was één uur, we hebben scenario's met en zonder regeling getest.

Cases	Weging			Resultaten simulatie	
	λ_1	λ_2	$\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$	TTS [veh·h]	TE [kg]
Case 1	0	0	0	383.1	13.24
Case 2	1	0.01	0	210.4	14.92
Case 3	0	0.01	1	340.6	8.29
Case 4	1	0.01	1	340.2	8.27

TABEL 2. Cases met weging en resultaten

Case 1 beschrijft een ongeregeld scenario. TTS is 383.1 veh·h, TE is 13.24kg. Als we een doelfunctie kiezen die er speciaal op gericht is de TTS te verlagen (Case 2), dan vermindert de TTS met 45%, maar de TE stijgt flink met ruim 12%. De kortere reistijden gaan dus ten koste van het milieu. Als we de doelfunctie zo kiezen dat de uitstoot minimaal is (Case 3), dan verminderen zowel de TTS (11%) als de TE (37%). Dit is opvallend, de TTS in Case 3 is weliswaar langer dan de TTS in Case 2, maar het toont wel aan dat het regelen op TE niet ten koste hoeft te gaan van de TTS.

In de laatste Case is een weging gemaakt van het optimaliseren op TTS en TE. Het is opvallend dat het verschil tussen Case 4 en Case 3 minimaal is, terwijl het verschil tussen Case 4 en Case 2 erg groot is. Kennelijk is het gebruik van TE direct al gunstig voor het vinden van een compromis tussen TTS en TE. Dit in tegenstelling tot TTS: sterke nadruk op TTS gaat in deze case study ten koste van de TE. Betere doorstroming of betere snelheden zijn niet altijd goed voor de hoeveelheid uitstoot. Het blijkt dat MPC geschikt is om een goed compromis tussen TTS en TE te vinden.

Conclusies

Als we gebruik maken van microsimulatie voor de verkeersmodellering en van een functie die voor ieder voertuig bij iedere snelheid de uitstoot van schadelijke emissies uitrekent kunnen we een betrouwbare schatting geven van de totale hoeveelheid emissies op een stuk weg in een bepaalde tijd. Als we naast de totale emissie (TE) ook de totale verblijfstijd (TTS) voor verschillende scenario's genereren, kunnen we een beeld krijgen van het verband tussen maatregelen, de reistijden en de emissies. Intuïtief zou men wellicht een conflict tussen reistijden en emissies verwachten.

Op basis van de resultaten van een eenvoudige simulatie blijkt dat dit conflict vooral optreedt wanneer men eenzijdig op TTS optimaliseert, dit gaat namelijk ten koste van TE. Als men eenzijdig op TE optimaliseert, blijkt dit ook gunstig te zijn voor de TTS. Als men op zowel TE als TTS optimaliseert zijn 37% reductie van TE en 11% reductie van TTS mogelijk. Het verschil tussen eenzijdig op TE optimaliseren en zowel op TE als TTS optimaliseren blijkt in de gebruikte case vrij klein te zijn.

In de toekomst willen we proeven doen met complexere case studies met toe- en afritten en meer rijstroken, om de trade-off tussen TTS en TE beter te kunnen bestuderen. Ook willen we gebruik maken van verfijndere uitstootmodellen en betere verkeersmodellen om tot betere resultaten te komen. Daarnaast willen we naast MPC verschillende andere regelstrategieën testen.

Literatuur

1. K. Ahn, A. A. Trani, H. Rakha, and M. Van Aerde. Microscopic fuel consumption and emission models. In *Proceedings of the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington DC, USA, January 1999. CD-ROM.
2. P. G. Boulter, T. Barlow, I. S. McCrae, S. Latham, D. Elst, and E. van der Burgwal. Road traffic characteristics, driving patterns and emission factors for congested situations. Technical report, TNO Automotive, Department Powertrains-Environmental Studies & Testing, Delft, The Netherlands, 2002. OSCAR Deliverable 5.2.
3. M. Brackstone and M. McDonald. Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F*, 2(4):181–196, 2000.
4. D. Gazis, R. Herman, and R. Rothery. Nonlinear follow the leader models of traffic flow. *Operations Research*, 9(4):545–567, 1961.
5. P. M. Pardalos and M. G. C. Resende. *Handbook of Applied Optimization*. Oxford University Press, Oxford, UK, 2002.
6. WHO. Health aspects of air pollution, *Results from the WHO projects “Systematic review of health aspects of air pollution in Europe”*. Technical report, World Health Organization, June 2004.
7. S.K. Zegeye, B. De Schutter, H. Hellendoorn, E. Breunese, Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control. In: *2009 American Control Conference*, St. Louis (MO), 2009.

Kortweg

- Het is mogelijk om met behulp van simulaties de emissiewaarden van schadelijke stoffen op een stuk snelweg te schatten.
- Eenzijdig op goede reistijden optimaliseren is ongunstig voor het milieu.
- Er is een compromis mogelijk tussen aanvaardbare emissiewaarden en goede reistijden.
- Model Predictive Control is een goed hulpmiddel om vooruitkijkend het verkeer te regelen.