Delft University of Technology

Delft Center for Systems and Control

Technical report 04-011

Modelgebaseerde voorspellende regeling voor geïntegreerde optimale routegeleiding en toeritdosering*

A. Karimi, A. Hegyi, B. De Schutter, J. Hellendoorn, and F. Middelham

If you want to cite this report, please use the following reference instead:
A. Karimi, A. Hegyi, B. De Schutter, J. Hellendoorn, and F. Middelham, "Modelgebaseerde voorspellende regeling voor geïntegreerde optimale routegeleiding en toeritdosering," *Tijdschrift Vervoerswetenschap*, vol. 40, no. 2, pp. 8–14, July 2004. In Dutch.

Delft Center for Systems and Control
Delft University of Technology
Mekelweg 2, 2628 CD Delft
The Netherlands
phone: +31-15-278.24.73 (secretary)
URL: https://www.dcsc.tudelft.nl

* This report can also be downloaded via https://pub.bartdeschutter.org/abs/04_011.html

Modelgebaseerde voorspellende regeling voor geïntegreerde optimale routegeleiding en toeritdosering

A. Karimi*, A. Hegyi*, B. De Schutter*, J. Hellendoorn*, F. Middelham#

* Delft Center for Systems and Control, Technische Universiteit Delft
Mekelweg 2, 2628 CD Delft, Nederland
tel: +31-15-278 51 19 (secr.), fax: +31-15-278 66 79
email: {a.hegyi,b.deschutter,j.hellendoorn}@dcsc.tudelft.nl

Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Boompjes 200, 3000 BA Rotterdam, Nederland
tel: +31-10-282 58 80, fax: +31-10-282 56 44
email: f.middelham@avv.rws.minvenw.nl

Samenvatting

In dit artikel stellen wij een verkeersregelingsmethode voor die toeritdosering en routegeleiding combineert en die gebruik maakt van een modelgebaseerde voorspellende regeling. Het hoofddoel van de regeling is om de totale tijd die alle voertuigen samen in het netwerk doorbrengen (TTS: *Total Time Spent*) te minimiseren door een gecombineerde actie van routegeleiding (of beter gezegd: het tonen van verwachte reistijden voor verschillende alternatieve routes) en toeritdosering, waarbij de regeling er ook voor zorgt dat de getoonde reistijden zo goed mogelijk overeenstemmen met de ervaren reistijden. Door enerzijds de TTS te minimiseren en anderzijds het verschil tussen de getoonde en de werkelijk gerealiseerde reistijden ook zo te klein mogelijk te maken ontstaat een afweging die zowel de belangen van de wegbeheerder als de belangen van de individuele weggebruikers op een evenwichtige wijze nastreeft. Simulatieresultaten voor een eenvoudige *case study* tonen aan aan dat deze modelgebaseerde voorspellende regeling resulteert in een lagere TTS en tergelijkertijd de weggebruikers ook voorziet van accurate reistijdinformatie.

Abstract

In this paper we propose a traffic control approach that integrates ramp metering and dynamic route guidance using a model predictive control framework. The main objective of the control is to minimize the total time spent by the vehicles in the network (TTS) by providing accurate travel times while taking into account the effect of other traffic control measures, such as ramp metering. By aiming at minimizing the TTS as well as the difference between travel times shown on the dynamic route information panels and the travel times actually realized by the drivers, the interests of both the individual drivers as well as the road administration are pursued. Simulation results for a case study show that the proposed model predictive control results in a lower TTS while at the same time the drivers get accurate travel time information.

1 Inleiding

Voor het regelen en sturen van verkeersstromen hebben wegbeheerders een aantal maatregelen tot hun beschikking. In dit artikel beschouwen wij het gecombineerd gebruik van dynamische routegeleiding en toeritdosering. Dynamische routegeleiding wordt gebruikt om de weggebruikers te informeren over

Figuur 1: Links (met dank aan Peek Traffic B.V.): Een DRIP toont de filelengtes of reistijden voor de alternatieve routes naar een bepaalde eindbestemming. Rechts: Toeritdosering bij de A13 in Delft.

de actuele en verwachte reistijden of fileslengtes (zie Figuur 1 (links)), zodat ze eventueel hun keuze voor een bepaalde route kunnen aanpassen of veranderen. Bij toeritdosering wordt er aan de toerit van een snelweg een verkeerslicht geplaatst (zie Figuur 1 (rechts)), waarmee dan de extra instroom naar de snelweg vanwege de toerit kan gestuurd worden zodanig dat het totale debiet van voertuigen op de snelweg na de toerit nog steeds beneden de capaciteit van de snelweg blijft. Bij het gebruik van dynamische routegeleiding als verkeersmaatregel met het oog op beïnvloeding van routekeuzes moet er wel op gelet worden dat de getoonde reistijden ook betrouwbaar zijn en overeenkomen met de reistijden die de weggebruikers ervaren, want anders zullen de weggebruikers hun vertrouwen in de getoonde informatie verliezen. In de aanpak die wij hier voorstellen zal de regeling er daarom actief voor zorgen dat de fout tussen getoonde en werkelijke reistijden zo klein mogelijk is. Hiertoe passen wij een gecombineerde aanpak toe die gebruik maakt van routegeleiding en toeritdosering (of andere verkeersmaatregelen, maar dit laatste valt buiten het bestek van dit artikel).

Op dynamische routegeleidingspanelen (DRIP's: *dynamic route information panels*) wordt gewoonlijk één van de drie volgende types informatie getoond voor de verschillende alternatieve routes: reistijden, vertragingen of filelengtes. Als we ervan uitgaan dat de weggebruikers hun reistijd willen minimiseren, dan lijkt de informatie over vertraging en filelengte niet zo bruikbaar, aangezien een kleinere vertraging niet noodzakelijk een kortere reistijd inhoudt (de nominale reistijden op de alternatieve routes kunnen immers verschillend zijn). Verder hangt de relatie tussen filelengte en reistijd af van de snelheid, die ook verschillend kan zijn voor de verschillende alternatieve routes.

De enige overblijvende optie is dan het tonen van de reistijden. Hierbij kan men opteren voor het tonen van de ogenblikkelijke, actuele reistijden of voor het tonen van verwachte reistijden. Het nadeel van de ogenblikkelijke reistijden is dat het verschil tussen de ogenblikkelijke en de werkelijk ervaren reistijden groot kan worden als de verkeerstoestand intussen verandert. Als er b.v. een file is waarvan de lengte toeneemt, dan zal de file reeds veel langer zijn op het moment dat de bestuurder de staart van de file bereikt dan wat werd aangegeven op het moment dat hij of zij de boodschap op de DRIP zag. Omdat routegeleiding er net op gericht is om bestuurders in dergelijke situaties te ondersteunen, is het tonen van verwachte reistijden dus een betere optie. Verder helpt dit ook om de verschillen tussen de getoonde en de werkelijke reistijden klein te houden. Om te garanderen dat de weggebruikers (blijven) vertrouwen op de getoonde reistijdinformatie en hun routes overeenkomstig

aanpassen, is het immers belangrijk dat de voorspellingsfouten van de DRIP's beperkt blijven.

Het gebruik van verwachte reistijden resulteert niet altijd in een verdeling over de alternatieve routes die optimaal is vanuit het systeemoogpunt. Om de gewenste verdeling te bereiken, is het dus soms nodig om „incorrecte" informatie te tonen (b.v. een getoonde reistijd van 20 min, terwijl de werkelijke reistijd 18 min zal zijn), waarbij de fout wel klein moet blijven zoals hierboven reeds werd uitgelegd. Dit betekent dat er een tegenstelling of conflict ontstaat tussen het informeren van de weggebruikers aan de ene kant en het regelen van het verkeer naar een betere prestatie aan de andere kant (cf. [10]). Wij lossen dit conflict op door gebruik te maken van een regelstrategie die accurate reistijden aangeeft en tegelijkertijd ook zorgt voor een optimalisatie van de netwerkpresentatie via DRIP-boodschappen en toeritdosering. Dit houdt in dat wij zullen werken met *geoptimaliseerde* reistijden die als regelsignaal beschouwd worden en die samen met andere regelsignalen (in het bijzonder de toeritdoseringsignalen) geoptimaliseerd worden.

De combinatie van toeritdosering en dynamische routegeleiding gebruik makend van optimale regeling werd bestudeerd in [6, 11]. Daar werd de optimale verdeling over de alternatieve routes berekend met behulp van METANET-DTA en de toeritdoseringssignalen met behulp van het ALINEA *feedback* algoritme. Het nadeel van de aanpak van [6, 11] is dat het zeer moeilijk is om de regelsignalen te vinden die overeenkomen met de optimale verdeling, m.a.w. het is niet gemakkelijk om de verkeersmaatregelen zo aan te sturen dat de werkelijke verdeling inderdaad overeenkomt met de berekende optimale verdeling. Dat laatste zou wel kunnen bewerkstelligd worden indien men gebruik kan maken met *in-car* systemen of persoonsgebonden file-informatiediensten, maar dit geldt niet voor DRIP's. Gerelateerd onderzoek wordt beschreven in [1, 14].

De in dit artikel voorgestelde aanpak is gebaseerd op voorspellende en geïntegreerde, gecoördineerde regeling. Beide aspecten zijn belangrijk om een zo goed mogelijke prestatie op netwerkniveau te kunnen halen. Als de reistijdinformatie op de DRIP's niet op voorspellingen gebaseerd is maar b.v. op actuele reistijden, dan zal de DRIP-informatie pas verandering in de routekeuze veroorzaken als de werkelijke reistijden al verschillen voor de alternatieve routes (dus als het netwerk al uit evenwicht is). Als de voorspellingen wel gebruikt worden, kunnen de DRIP's anticiperen op de processen die het netwerk uit evenwicht zouden kunnen brengen (zoals b.v. een schokgolf (cf. paragraaf 4)) zodat ze het netwerk meer in evenwicht kunnen houden. Hierdoor is te verwachten dat bij een niet-voorspellende regeling de netwerkprestatie minder zal zijn dan bij een voorspellende regeling. Verder geldt dat als de regeling via de DRIP's en via de toeritdoseringsinstallaties niet-gecoördineerd is, de toeritdoseringsinstallaties geen rekening zullen houden met het doel om de reistijdvoorspellingen zo goed mogelijk te waarborgen, wat betekent dat de verspellingsfout groter zal zijn dan in de situatie met gecoördineerde regeling. Daarnaast zullen de DRIP's ook geen rekening houden met de geplande toeritdoseringssignalen, zodat de netwerkprestatie ook slechter zal zijn.

In dit artikel stellen wij een modelgebaseerde voorspellende regeling voor gecombineerde dynamische routegeleiding en toeritdosering voor. Deze aanpak maakt gebruik van een model van het verkeerssysteem om te voorspellen hoe het verkeer zich zal gedragen voor een gegeven verkeersaanbodpatroon en gegeven regelsignalen. In paragraaf 2 beschrijven we kort de modellen die wij gebruiken om de evolutie van de verkeersstromen en de reacties van de weggebruikers op routegeleidingsinformatie te beschrijven. Vervolgens stellen we de modelgebaseerde voorspellende verkeersregeling voor in paragraaf 3. Tenslotte illustreren we deze aanpak voor een eenvoudige *case study* in paragraaf 4.

2 Verkeersmodellen

Het voorspellingsmodel bestaat uit drie onderdelen, die respectievelijk de evolutie van de verkeersstromen (hiervoor gebruiken we het METANET-model), de reactie van weggebruikers op DRIP-informatie en de berekening van de reistijden beschrijven.

2.1 METANET-model

METANET [13, 15] kan gebruikt worden voor het modelleren en simuleren van verkeersstromen. In METANET wordt het verkeersnetwerk voorgesteld door een grafe met knooppunten en verbindingen, waarbij elke verbinding overeenkomt met een stuk snelweg met uniforme eigenschappen. Elke verbinding wordt onderverdeeld in een aantal segmenten (met een typische lengte van 500 m tot 1 km).

Het METANET-model is een macroscopisch model, wat inhoudt dat de evolutie van de verkeerstromen beschreven wordt door geaggregeerde, gemiddelde grootheden. Voor elk segment wordt de verkeerstoestand gekarakteriseerd door de gemiddelde snelheid (km/uur), het debiet (voertuigen/uur) en de gemiddelde dichtheid (voertuigen/km/rijstrook) van het gegeven segment. De evolutie in de tijd van deze toestandsvariabelen wordt in het METANET-model beschreven als een functie van de toestandsvariabelen in het gegeven segment en die van het stroomafwaartse en het stroomopwaartse buursegment. Omdat wij in onze toepassing expliciet routes en routekeuzes meenemen, zullen wij gebruik maken van de zogenaamde *destination-oriented* versie van het METANET-model, waarin bij elke splitsing per bestemming de verdeling van het verkeer over de verschillende uitgaande verbindingen kan gedefinieerd worden.

Voor een meer gedetailleerde uitleg van het METANET-model verwijzen wij naar [13, 15] en naar [2, 8], waar eveneens enkele uitbreidingen voorgesteld worden.

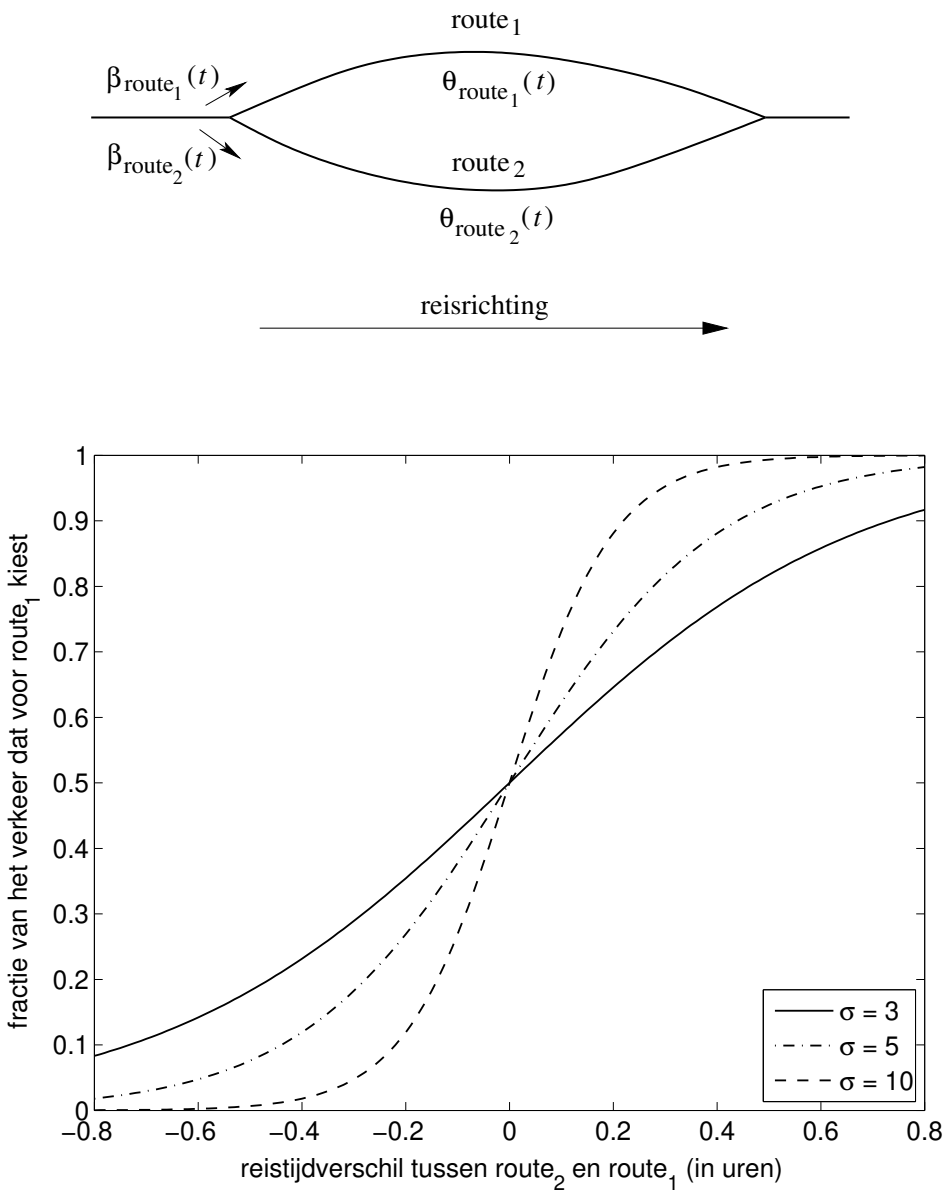
2.2 Routekeuzemodel

Het METANET-model beschrijft de evolutie van de verkeersstromen in een netwerk. Eén van de variabelen in dit model is de routekeuze- of verdelingsparameter β, die het gevolg is van het gedrag van de weggebruikers en die in ons geval beïnvloed wordt door de reistijden die op de DRIP's getoond worden. Wij hebben dus een model nodig dat beschrijft hoe weggebruikers reageren op reistijdinformatie en hoe zij hun routekeuze aanpassen.

Een zeer bekend keuzegedragsmodel is het logit-model [4, 16], dat wordt gebruikt om het keuzegedrag van consumenten te modelleren op basis van de (kost)prijs van beschikbare alternatieven. Hoe lager de prijs van een gegeven alternatief is, hoe meer consumenten voor dat alternatief zullen kiezen. In verkeerstoepassingen kan het logit-model eveneens gebruikt worden, waarbij de consumenten de weggebruikers zijn en de kostprijs het comfort, de veiligheid of de reistijd naar een gegeven bestemming is.

In de routekeuze-context berekent het logit-model de kans dat een weggebruiker een bepaalde route kiest op basis van de verschillen in reistijden tussen de alternatieve routes. Veronderstel dat er in een gegeven knooppunt n twee routes mogelijk zijn (route_1 en route_2) naar bestemming j (merk op dat de uitbreiding naar drie of meer alternatieve routes ook mogelijk is). Voor de berekening van de verdelingsparameter β op een gegeven tijdstip t uitgaande van de reistijdverschillen tussen de twee alternatieve routes resulteert het logit-model in

$$\beta_{\text{route}_i}(t) = \frac{\exp(\sigma\, \vartheta_{\text{route}_i}(t))}{\exp\left(\sigma\, \vartheta_{\text{route}_1}(t)\right) + \exp\left(\sigma\, \vartheta_{\text{route}_2}(t)\right)}$$



Figuur 2: Voorbeeld van de verdeling tussen twee alternatieve routes volgens het logit-model als functie van het reistijdverschil. Voor deze grafiek werd uitgegaan van $\vartheta_{\text{route}_2}(t) = 1$ uur.

voor $i = 1$ of $i = 2$, waarbij $\beta_{\text{route}_i}(t)$ de fractie van de weggebruikers is die op tijdstip t voor route$_i$ zullen kiezen en $\vartheta_{\text{route}_i}(t)$ de reistijd is die getoond wordt op de DRIP bij knooppunt n om naar bestemming j te reizen via route$_i$. De parameter σ beschrijft hoe weggebruikers reageren op het verschil tussen de twee reistijden. Hoe groter σ is, hoe kleiner het tijdsverschil wordt dat nodig is om de weggebruikers voor de snelste route te doen kiezen. In Figuur 2 wordt een voorbeeld weergegeven van het logit-model voor verscheidene waarden van σ.

2.3 Berekening van de individuele reistijden

Om het verschil tussen de reistijden die op de DRIP's getoond worden en de werkelijk reistijden te kunnen bepalen moeten we individuele reistijden kunnen berekenen. Deze berekening is gebaseerd op [5] en verloopt via het volgen van een aantal peilvoertuigen doorheen het netwerk in elke simulatiestap. Als een peilvoertuig voorbij een DRIP komt, dan wordt de op die DRIP getoonde informatie opgeslagen. Wanneer het voertuig het netwerk verlaat, wordt de werkelijke reistijd bepaald. Het verschil tussen de getoonde en werkelijke reistijd wordt dan meegenomen in de prestatiefunctie voor de regeling (zie paragraaf 3).

De reistijden worden als volgt bepaald. Elke N simulatiestappen worden een aantal virtuele voertuigen in het netwerk gestuurd en hun voortgang doorheen het netwerk wordt dan gevolgd tijdens de simulatie. Hiertoe wordt voor elk peilvoertuig de volgende informatie bijgehouden: de geplande route, de positie van het voertuig (d.w.z. verbinding, segment, en positie binnen het segment), de getoonde reistijden bij de DRIP's die het voertuig reeds is tegengekomen, de werkelijke reistijd van die DRIP's tot de huidige positie en het tijdstip waarop het voertuig het netwerk verlaat (indien het voertuig het netwerk reeds heeft verlaten).

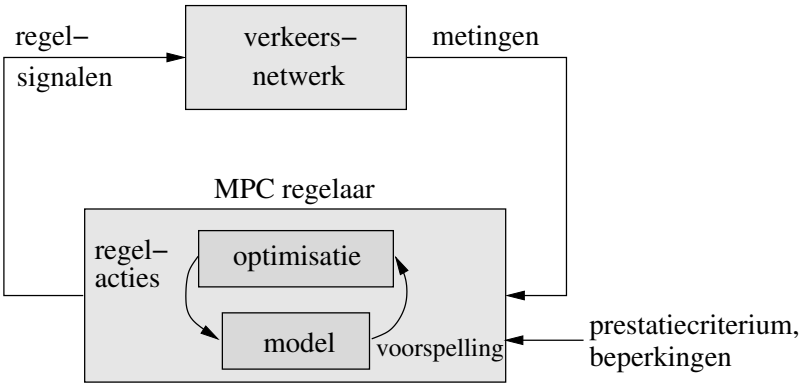
Om de positie van de peilvoertuigen en hun reistijden te kunnen volgen, moet het METANET-model als volgt worden aangepast. Op basis van het METANET-model kunnen we voor alle routes in het netwerk het tijdsafhankelijke snelheidsprofiel bepalen. Op basis van de vorige positie en dit snelheidsprofiel kan dan de positie van elk peilvoertuig aan het einde van elke simulatiestap bepaald worden. De reistijden vanaf de DRIP's tot de huidige positie zijn gelijk aan de reistijden uit de vorige simulatiestap plus de lengte van de simulatietijdstap.

3 Modelgebaseerde voorspellende regeling (MPC)

MPC (*model predictive control*) [3, 7, 12] is een *on-line* modelgebaseerde voorspellende regelingmethode die zijn oorsprong heeft in de procesindustrie. Een belangrijk voordeel van MPC is dat allerlei voorwaarden en beperkingen op de ingangen, uitgangen en toestandsvariabelen van het te regelen systeem en op de regelsignalen bij het regelaarontwerp expliciet kunnen meegenomen worden. Voor verkeersregeling kunnen we zo b.v. een minimaal of maximaal toegelaten toeritdoseringsdebiet opleggen, maximale cyclustijden voor verkeerslichten, maximale wachtrijlengtes, enz. In dit artikel bestaan de regelsignalen uit de toeritdoseringssignalen en de reistijden die op de DRIP's getoond worden. Figuur 3 geeft een schematisch overzicht van MPC voor verkeersregeling. We zullen nu de verschillende componenten van deze figuur nader toelichten.

MPC is een discrete-tijd regelmethode waarbij de regelsignalen regelmatig aangepast worden. Stel dat T_c de tijdstap van de regeling voorstelt (een typische waarde is 1 tot 5 minuten). In MPC wordt op een gegeven tijdstip $t = kT_\mathrm{c}$ de toekomstige evolutie van de verkeerstoestand over een voorspellingsperiode $[t, t + N_\mathrm{p}T_\mathrm{c}]$ voorspeld op basis van een model, waarbij N_p de voorspellingshorizon is. Als voorspellingsmodel gebruiken wij het uitgebreide METANET-model beschreven in paragraaf 2. De toestandsvector voor het verkeersnetwerk bevat de partiële dichtheden en gemiddelde snelheid in elk segment van elke verbinding, de partiële wachtrijlengtes aan de ingangen van het netwerk, en de huidige posities en reistijden van de virtuele peilvoertuigen. De voorspelling houdt verder ook rekening met externe ingangssignalen zoals het verkeersaanbod en de samenstelling (opgesplitst naar mogelijke bestemmingen) aan de ingangen van het netwerk.

MPC gebruikt numerieke optimalisatietechnieken om de opeenvolgende regelsignalen $u(k), \ldots, u(k + N_\mathrm{p} - 1)$ te bepalen die ervoor zorgen dat de prestatie van het systeem geoptimaliseerd wordt rekening houdend met de opgelegde beperkingen. In ons geval wordt de prestatie J gegeven door een



Figuur 3: Schematische voorstelling van MPC.

gewogen som van de totale reistijd voor alle voertuigen samen (TTS: *total time spent*, inclusief snelwegen, onderliggend wegennet en de wachtrijen op de toeritten), de voorspellingsfout in de reistijden en de variatie van de regelsignalen over de voorspellingsperiode $[t, t+N_\mathrm{p}T_\mathrm{c}]$:

$$J(k) = \xi_1 \cdot (\mathrm{TTS}) + \xi_2 \cdot (\text{voorspellingsfout}) + \xi_3 \cdot (\text{variatie van de regelsignalen}) \ .$$

De ξ_i's zijn gewichtsfactoren die het relatieve belang van de verschillende termen van de prestatiefunctie aangeven. De waarden van de ξ_i's hangen in principe af van de doelstellingen van de wegbeheerder.

Om het aantal optimalisatievariabelen te verkleinen en om een zachter verlopend regelsignaal te verkrijgen wordt er in MPC een zogenaamde regelhorizon N_c ingevoerd (met $N_\mathrm{c} \leqslant N_\mathrm{p}$). Het regelsignaal wordt dan constant genomen zodra de regelhorizon overschreden is:

$$u(k+l) = u(k+N_\mathrm{c}-1) \qquad \text{voor } l = N_\mathrm{c}, \ldots, N_\mathrm{p}-1 \, .$$

Merk op dat dit inhoudt dat de effectief te berekenen regelsequentie dus $u(k), \ldots, u(k+N_\mathrm{c}-1)$ is.

Om verstoringen, modelfouten en (trage) veranderingen in de systeemparameters te kunnen opvangen, maakt MPC gebruik van een glijdende-horizonaanpak die als volgt verloopt:

1. Op het huidige tijdstip $t = kT_\mathrm{c}$ meten of schatten we de huidige toestand van het verkeersnetwerk.

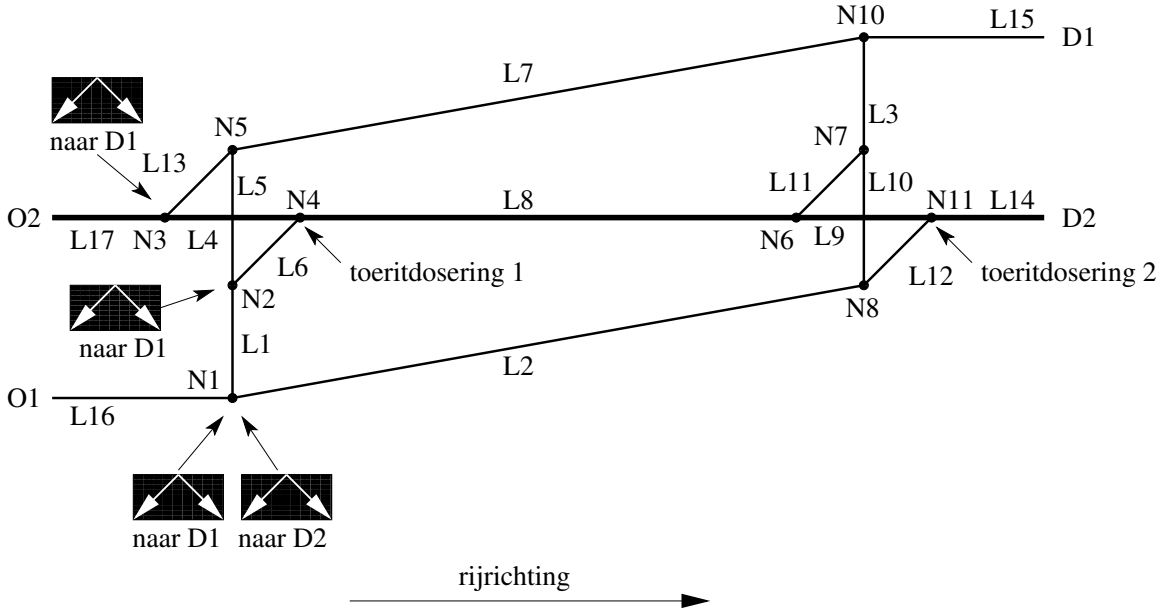
2. Dan lossen we het MPC-regelprobleem op om de optimale regelsequentie $u(k), \ldots, u(k+N_\mathrm{c}-1)$ te bepalen.

3. We passen het eerste element $u(k)$ van de regelsequentie toe op het systeem.

4. Op het volgende regeltijdstip (d.w.z. op tijdstip $t = kT_\mathrm{c} + T_\mathrm{c}$) zetten we $k := k+1$ en herhalen we het hele proces vanaf Stap 1 (met een herschatting van de modelparameters om de M stappen met M een geheel getal (b.v. $M = 10$)).

Deze glijdende-horizonaanpak zorgt voor *feedback* in de regellus (cf. Figuur 3) en voor een zekere mate van robuustheid.

De belangrijkste instelparameters voor de MPC-aanpak zijn de voorspellingshorizon N_p en de regelhorizon N_c. Hiervoor kunnen we de volgende vuistregels gebruiken. De voorspellingshorizon N_p moet zodanig gekozen worden dat een voertuig door het hele beschouwde netwerk kan rijden binnen de voorspellingsperiode. Dit betekent dat de langste reistijd in het *worst-case* scenario (d.w.z. met



Figuur 4: Het verkeersnetwerk van de *case study* heeft twee herkomsten (O1 en O2) en twee bestemmingen (D1 en D2). Het netwerk bevat een snelweg (bestaande uit verbindingen L17, L4, L8, L9 en L14) en onderliggend wegennet (de andere verbindingen). Er zijn vier DRIP's en twee toeritdoseringsinstallaties.

aanwezigheid van files) beschouwd moet worden om N_p te bepalen. De regelhorizon N_c moet zo ingesteld worden dat een optimale prestatie verkregen wordt zonder dat de rekentijd voor het berekenen van de optimale regelsequentie te lang wordt.

4 Case study

Om de hierboven voorgestelde aanpak te illustreren, beschouwen we nu een synthetische *case study* met een eenvoudig netwerk dat alle relevante kenmerken en onderdelen bevat die nodig zijn om de voorgestelde MPC-gebaseerde methode voor geïntegreerde routegeleiding en toeritdosering te illustreren.

4.1 Beschrijving van het netwerk

Het netwerk van de *case study* is zo eenvoudig mogelijk gekozen maar wel zodat het alle essentiële elementen bevat die nodig zijn om de MPC-gebaseerde methode voor geïntegreerde routegeleiding en toeritdosering te kunnen illustreren. Figuur 4 toont het beschouwde netwerk, dat bestaat uit twee ingangen of herkomsten O1 en O2 en twee bestemmingen D1 en D2. Herkomst O2 en bestemming D2 zijn gelegen op de snelweg, die bestaat uit verbindingen L17, L4, L8, L9 en L14). Herkomst O1 en bestemming D1 maken deel uit van het onderliggend wegennet (dat uit de andere verbindingen bestaat). Elke verbinding bestaat uit één of meer segmenten van 1 km met uitzondering van de toeritverbindingen (L6, L12), die 700 m lang zijn.

Wij beschouwen slechts één rijrichting (van O1 en O2 naar D1 en D2). Voor een aantal herkomst-bestemmingsparen kunnen de weggebruikers kiezen of ze via de snelweg of via het onderliggend

wegennet rijden. Zo zijn er drie alternatieve routes van O1 naar D1, twee alternatieve routes van O1 naar D2 en van O2 naar D1, en één route van O2 naar D2. Op de knooppunten N1, N2 en N3 zijn DRIP's geplaatst die de volgende informatie weergeven:

- Op knooppunt N1 zijn er twee DRIP's: één voor bestemming D1 en één voor bestemming D2. De DRIP voor bestemming D1 toont drie reistijden omdat er drie alternatieve routes zijn van knooppunt N1 naar bestemming D1: L1-L6-L8-L11-L3-L15, L1-L5-L7-L15 en L2-L10-L3-L15. De DRIP op knooppunt N1 voor bestemming D2 toont twee reistijden: voor routes L1-L6-L8-L9-L14 en L2-L12-L14.

- Op knooppunt N2 is er slechts één manier om naar bestemming D2 te rijden en zijn twee alternatieve routes naar bestemming D1: L6-L8-L11-L3-L15 en L5-L7-L15.

- Op knooppunt N3 is slechts één manier om naar bestemming D2 te rijden en zijn twee alternatieve routes naar bestemming D1: L13-L7-L15 en L4-L8-L11-L3-L15.

Waar de onderliggende wegen de snelweg kruisen zijn er toeritten en afritten. Elke toerit is voorzien van een toeritdoseringsinstallatie. Verkeer afkomstig van het onderliggende wegennet dat via de snelweg wil reizen met via één van de twee toeritten passeren. Het verkeer op de snelweg dat naar bestemming D1 wil reizen, moet langs één van de twee afritten.

4.2 Verkeersscenario

We beschouwen het volgende scenario:

- Bij de start van de simulatie is er een capaciteitsvermindering bij bestemming D2, wat aanleiding geeft tot een schokgolf met als oorsprong D2. De staart van de schokgolf beweegt zich stroomopwaarts totdat er een file ontstaat op het stroomafwaartse einde van de snelwegverbinding L8. Berekeningen tonen aan dat in dit geval de alternatieve routes van herkomst O1 naar bestemming D1 sneller worden, wat tot gevolg heeft dat meer weggebruikers deze routes zullen nemen.

- De simulatie start vanuit een evenwichtssituatie met de volgende debieten: 600 voertuigen/uur voor het herkomstbestemmingspaar (O1,D1), 1400 voertuigen/uur voor (O1,D2), 900 voertuigen/uur voor (O2,D1) en 2100 voertuigen/uur voor (O2,D2). Vijf minuten na het begin van de simulatie neemt het totale aanbod bij herkomst O2 echter toe, wat resulteert in een debiet van 1200 voertuigen/uur voor het herkomstbestemmingspaar (O2,D1) en 2800 voertuigen/uur voor (O2,D2).

4.3 Parameters van het model en de regeling

De parameters voor het METANET-model die wij in deze simulatie gebruikt hebben zijn gebaseerd op die van de METANET-validatie beschreven in [9]. De extra parameters voor de modeluitbreidingen zijn dezelfde als [2, 8].

Voor de regeling hebben we $T_c = 5$ min genomen. De voorspellingshorizon $N_p = 12$ komt overeen met een voorspellingsperiode van 1 uur. Voor de regelhorizon nemen we $N_c = 9$, wat overeenkomt met 45 minuten. Dit is korter dan de voorspellingsperiode, maar lang genoeg om een goede prestatie te verkrijgen. Voor de gewichtsfactoren in het prestatiecriterium J hebben we $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = 1$ gekozen.

4.4 Simulatieresultaten

We hebben een simulatie met en zonder MPC-regeling uitgevoerd voor het netwerk en het scenario dat hierboven beschreven werd. We zullen nu de belangrijkste resultaten van deze simulaties bespreken.

Figuur 5 toont de evolutie van de snelheid in de snelwegverbinding L8 wanneer er geen regeling wordt toegepast. Deze verbinding komt overeen met het grootste stuk van de snelweg en wordt ook gebruikt door verkeer dat uiteindelijk via het onderliggend wegennet D1 als bestemming heeft. Door de schokgolf die via bestemming D2 het netwerk binnenkomt bij het begin van de simulatie, loopt de snelheid op de snelweg aanzienlijk terug. Omdat de weggebruikers niet ingelicht worden over de alternatieve routes (wat voor hen zou kunnen resulteren in kortere reistijden), blijven ze via verbinding L8 naar hun bestemming rijden. Het ontbreken van informatie voor de weggebruikers als het dynamische route-informatie-systeem niet actief is, leidt tot een inefficiënt gebruik van sommige verbindingen in het onderliggend wegennet, zoals verbinding L10. Hoewel L10 gebruikt kan worden om het verkeer via een alternatieve route sneller naar zijn bestemming te laten rijden, wordt deze link bijna niet benut in de situatie zonder regeling.

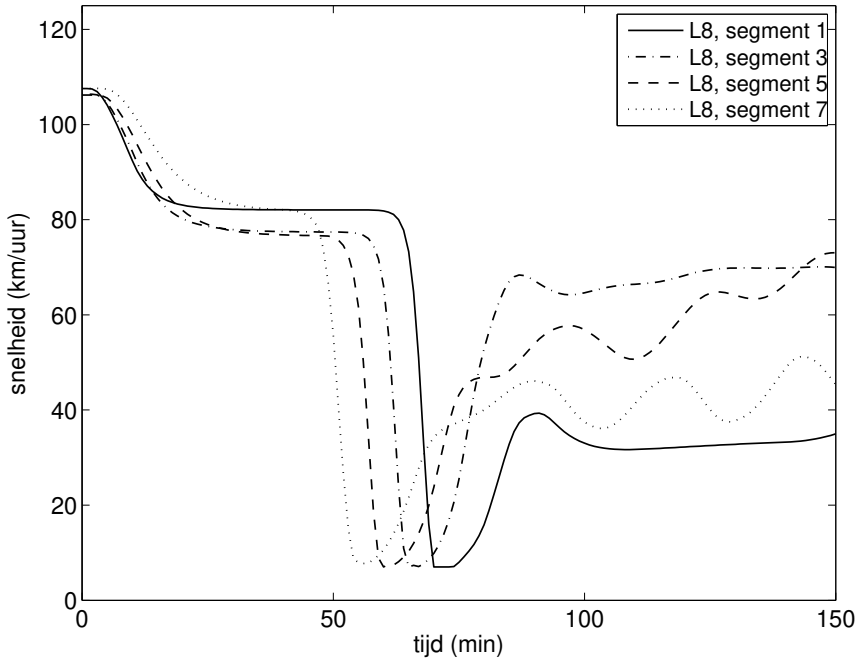
Wanneer dynamische routegeleiding geactiveerd wordt en MPC wordt toegepast, treedt er een aanzienlijke verbetering op in de gemiddelde snelheden op de snelweg zoals te zien is in Figuur 6. De snelweg wordt ontlast door de herroutering ten gevolge van de dynamische routegeleiding, waardoor meer verkeer de alternatieve routes via het onderliggend wegennet kiest. Dit resulteert in minder verkeer op verbinding L8 en hogere snelheden in vergelijking met de situatie zonder regeling. Bovendien zorgt de toeritdosering voor een verminderde instroom van verkeer met D2 als eindbestemming wat de doorstroom op de snelweg verbetert. Als gevolg van dit alles wordt de schokgolf aanzienlijk gedempt.

De evolutie van de debieten in verbinding L14 in de niet-geregelde en de geregelde situatie wordt weergegeven in Figuur 7. In de niet-geregelde situatie wordt zowel het debiet als de snelheden op deze verbinding sterk gereduceerd ten gevolge van de schokgolf. De schokgolf zorgt voor een verminderde uitstroom uit het netwerk met files en lagere snelheden in de rest van het netwerk als gevolg. Wanneer dynamische routegeleiding en MPC geactiveerd worden, verbetert het debiet op verbinding L14 aanzienlijk. De uitstroom uit het netwerk neemt ook toe doordat het effect van de schokgolf verminderd wordt door de herroutering en de toeritdosering.

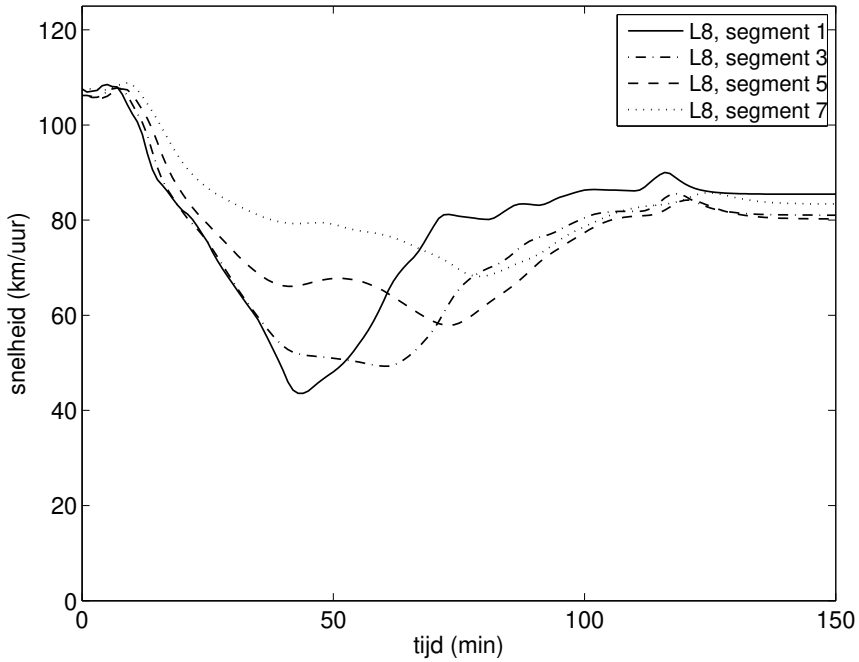
In Figuur 7 zijn er oscillaties te zien in de eerste 350 s van de simulatie. Deze oscillatie blijken niet afkomstig te zijn van de toeritdosering, aangezien het toeritdoseringssignaal trager varieert. De echte oorzaak van de oscillaties is ons nog niet bekend en is een onderwerp voor verder onderzoek.

Het verkeer met herkomst O2 en bestemming D1 kan via verbinding L13 rijden. Verkeer van O2 met bestemming D2 kan enkel via de snelweg gaan. Verkeer met herkomst O1 en bestemming D1 kan via verbinding L2 gaan. Verkeer van O1 naar D2 kan via verbinding L1 gestuurd worden. Dit verkeer moet dan vervolgens via toeritverbinding L6 rijden. Hoewel er geen kritieke situatie op verbinding L8 is bij de toerit, zal de toeritdosering anticiperen op het feit dat als alle verkeer tot de snelweg wordt toegelaten, de schokgolf niet optimaal gedempt kan worden. De toeritdosering laat wel tenminste 60 % van het verkeer op toeritverbinding L6 tot de snelweg toe. De toeritdosering geeft ook aanleiding tot een wachtrij op L6 die terugslaat naar verbinding L1, met een file van 2 km op link L1 tot gevolg.

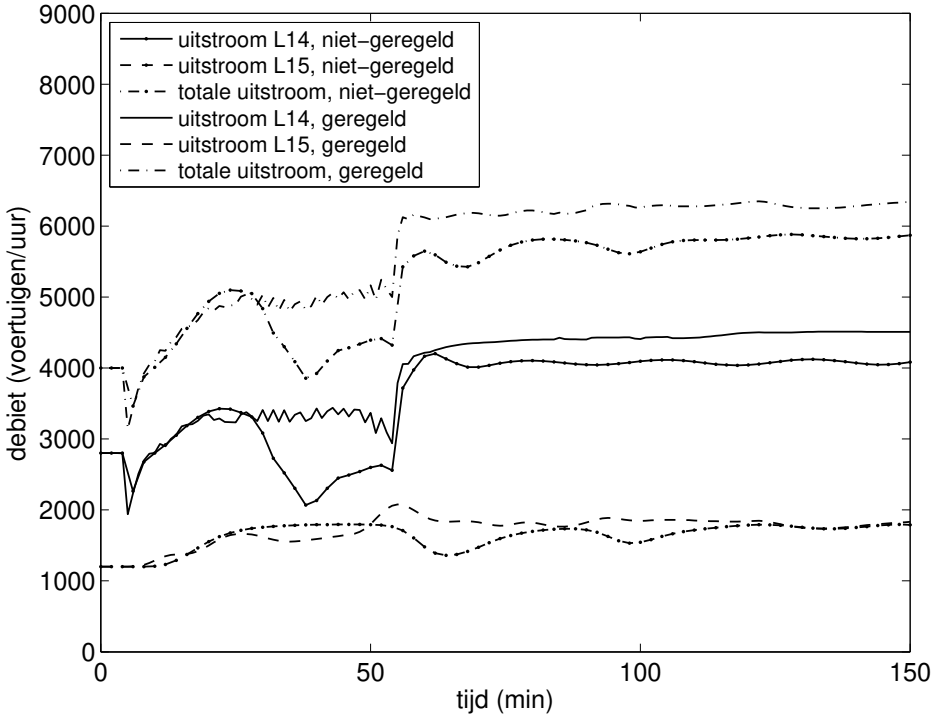
De TTS in de niet-geregelde situatie is 6365 voertuiguren in vergelijking met 4531 voertuiguren in de MPC-situatie, wat overeenkomt met een verbetering van 28.8 % voor de geregelde situatie.



Figuur 5: De evolutie van de gemiddelde snelheid in segmenten van verbinding L8 in de niet-geregelde situatie. In dit geval plant de schokgolf zich door de hele verbinding L8 voort en neemt de snelheid drastisch af.



Figuur 6: De evolutie van de gemiddelde snelheid in segmenten van verbinding L8 wanneer routegeleiding en toeritdosering toegepast worden. De routegeleiding en de toeritdosering zorgen er ervoor dat meer verkeer de alternatieve routes via het onderliggend wegennet neemt, wat resulteert in minder verkeer op de verbinding L8 en hogere snelheden in vergelijking met de niet-geregelde situatie.



Figuur 7: De evolutie van de uitstroom van het netwerk via de uitgaande verbindingen L14 en L15 en de totale uitstroom in de niet-geregelde en de geregelde situatie. De geregelde situatie geeft aanleiding tot een hogere uitstroom.

5 Besluit

In dit artikel hebben wij een verkeersregelprobleem beschouwd waarbij modelgebaseerde voorspellende regeling (MPC: *model predictive control*) gebruikt wordt in combinatie met toeritdosering en routegeleiding als verkeersmaatregelen.

Het eerste punt dat in dit artikel behandeld werd, was de integratie van toeritdosering en routegeleiding. In de voorgestelde aanpak werden DRIP's (*dynamic route information panels*) gebruikt als regelinstrument *en* als informatieverstrekking; de toeritdosering werd als regelinstrument gebruikt om de vertragingen te herverdelen over de toeritten en de snelweg. De reacties van de weggebruikers op de reistijden die op de DRIP's getoond worden, werd gemodelleerd met het logit-model. De getoonde reistijden zijn geoptimaliseerde reistijden die zodanig gekozen worden dat de prestatie van het verkeerssysteem maximaal is waarbij ook de reacties van de weggebruikers en de regelacties van de toeritdosering in rekening genomen worden. Dit resulteert in één optimalisatie die zowel de toeritdoseringssignalen als de reistijden die op de DRIP's getoond worden tegelijkertijd optimaliseert en wel zo dat enerzijds de totale reisduur voor alle voertuigen samen zo klein mogelijk gemaakt wordt door het verkeer optimaal te herrouteren over de beschikbare alternatieve routes en dat anderzijds de verschillen tussen de op de DRIP's getoonde reistijden en de werkelijke reistijden zo klein mogelijk gehouden worden.

Het tweede punt dat in dit artikel behandeld werd, is of de voorgestelde aanpak inderdaad leidt tot een verbeterde prestatie van het verkeerssysteem in filesituaties zoals beschreven in de *case study*. De simulaties voor deze *case study* tonen aan dat het herrouteren van het verkeer en de toeritdosering

gebruik makend van MPC tot een aanzienlijke verbetering van de prestatie kan leiden.

Enkele onderwerpen voor verder onderzoek zijn: uitbreiding van de voorgestelde aanpak tot andere verkeersmaatregelen, verder onderzoek van andere *case studies* en vergelijking met andere al dan niet voorspellende of geïntegreerde regelingen, verbetering van de efficiëntie van gebruikte optimalisatie-algoritmen en uitbreiding van de aanpak voor een gedistribueerde regeling om de schaalbaarheid van de voorgestelde MPC-gebaseerde methode te vergroten zodat ook grote netwerken geregeld zullen kunnen worden.

Acknowledgements

Dit onderzoek werd ondersteund door de Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, door het NWO-CONNEKT project "Advanced multi-agent control and information for integrated multiclass traffic networks (AMICI)", door het STW-VIDI project "Multi-agent control of large-scale hybrid systems" (DWV.6188), en door het TU Delft speerpunt programma "Mobility of People and Transportation of Goods (Towards Reliable Mobility)".

Referenties

[1] T. Bellemans, *Traffic Control on Motorways*. PhD thesis, Faculty of Applied Sciences, K.U.Leuven, Leuven, Belgium, mei 2003.

[2] P. Breton, A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn, "Shock wave elimination/reduction by optimal coordination of variable speed limits," in *Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'02)*, Singapore, pp. 225–230, sept. 2002.

[3] E.F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control in the Process Industry*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1995.

[4] J.S. Cramer, *An Introduction to the Logit Model for Economists*. London, UK: Timberlake Consultants Press, 2001.

[5] M. Cremer, "On the calculation of individual travel times by macroscopic models," in *Proceedings of the 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, Washington, D.C., pp. 187–193, 1995.

[6] C. Diakaki, M. Papageorgiou, and T. McLean, "Integrated traffic-responsive urban corridor control strategy in Glasgow, Scotland," *Transportation Research Record*, vol. 1727, 2000.

[7] C.E. García, D.M. Prett, and M. Morari, "Model predictive control: Theory and practice — A survey," *Automatica*, vol. 25, no. 3, pp. 335–348, mei 1989.

[8] A. Hegyi, B. De Schutter, H. Hellendoorn, and T. van den Boom, "Optimal coordination of ramp metering and variable speed control — An MPC approach," in *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, Anchorage, Alaska, pp. 3600–3605, mei 2002.

[9] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavis, and F. Middelham, "Traffic flow modeling of large-scale motorway using the macroscopic modeling tool METANET," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 282–292, dec. 2002.

[10] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, S. Manfriedi, J. van Schuppen, J. Taylor, and M. Westerman, "DACCORD – Development and application of co-ordinated control of corridors," Tech. rep. Deliverable D06.1, CWI, Amsterdam, The Netherlands, dec. 1997. Project TR 1017, Telematics Applications Programme, TRANSPORT.

[11] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, M. Mangeas, and H. Haj-Salem, "Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control," *Transportation Research Part C*, vol. 10, no. 1, pp. 65–84, feb. 2002.

[12] J.M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*. Harlow, England: Prentice Hall, 2002.

[13] A. Messmer and M. Papageorgiou, "METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks," *Traffic Engineering and Control*, vol. 31, no. 9, pp. 466–470, 1990.

[14] H. Taale and H.J. van Zuylen, "Traffic control and route choice: Occurrence of instabilities," in *TRAIL 5th Annual Congress 1999: Five Years Crossroads of Theory and Practice*, vol. 2, pp. 1–19, Trail, 1999.

[15] Technical University of Crete, Dynamic Systems and Simulation Laboratory and A. Messmer, *METANET – A simulation program for motorway networks*, juli 2000.

[16] H. Theil, "A multinomial extension of the linear logit model," *International Economic Review*, vol. 10, pp. 251–259, 1969.