

Technical report 06-044

Anticiperende netwerkgeregelingen*

H. Taale, S. Hoogendoorn, M. van den Berg, and B. De Schutter

If you want to cite this report, please use the following reference instead:

H. Taale, S. Hoogendoorn, M. van den Berg, and B. De Schutter, "Anticiperende netwerkgeregelingen," *NM Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 22–27, Dec. 2006. 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.deschutter.info/abs/06_044.html

Anticiperende netwerkregelingen

H. Taale*, S. Hoogendoorn[†], M. van den Berg[‡], B. De Schutter[§]

Samenvatting

Het ontwerpen van een goede verkeerslichtenregeling — een onmisbaar instrument in het verkeersmanagement — is geen gemakkelijke taak. De regeltechnicus moet een flink aantal (soms tegenstrijdige) belangen meenemen, zoals een vlotte afwikkeling van het autoverkeer, de veiligheid van fietsers en voetgangers, prioriteit voor het openbaar vervoer enzovoort. In dit artikel geven de auteurs een beeld van de huidige strategieën en netwerkregelingen én verkennen zij de mogelijkheden van het anticiperend regelen.

Het lijkt zo eenvoudig: het verkeer zó regelen dat het komende van het ene kruispunt ongehinderd kan doorrijden bij het volgende kruispunt. Maar schijn bedriegt. De theoretische achtergrond van netwerkregelingen is complex en in de afgelopen jaren is slechts stapsgewijs vooruitgang geboekt. Nederland heeft bovendien internationaal gezien nog maar weinig ervaring met netwerkregelingen, met name omdat onze focus op lokale intelligentie (gericht op één kruispunt: OV-prioriteit, fietsers enzovoort) heeft gelegen. En juist dit zorgt voor een 'remmende voorsprong': de lokale intelligentie maakte het moeilijker dan bij starre regelingen (met vaste groentijden) om naar netwerkregelingen over te stappen.

Bestaande netwerkregelingen

Hoewel het overgrote deel van de Nederlandse kruispunten nog lokaal wordt geregeld, heeft Nederland al een aantal buitenlandse regelsystemen voor netwerken geïmplementeerd en geëvalueerd. De toepassing van netwerkregelingen neemt ook toe. Hieronder een kort historisch overzicht en een beschrijving van de proeven die in Nederland gehouden zijn.

Drie generaties

Bij de ontwikkeling van netwerkregelingen werd begonnen met starre verkeerslichtenregelingen. Deze werden ontworpen met de formules van Webster of met programma's als TRANSYT. Op basis van invoergegevens over het netwerk en randvoorwaarden voor de kruispuntregelingen zoekt dit programma de beste regelingen. Dit doet het zodanig, dat een bepaalde indicator wordt geoptimaliseerd. Dat kan verliestijd zijn, maar ook brandstofverbruik. Groot nadeel van de eerste netwerkregelingen vormden

*Ir. Henk Taale is senior adviseur bij Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer. Hij werkt momenteel aan een promotieonderzoek over anticiperend regelen bij de TU Delft.

[†]Prof. dr. ir. Serge Hoogendoorn is hoogleraar verkeersstroomtheorie en -simulatie bij de afdeling Transport & Planning, Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft.

[‡]Ir. Monique van den Berg is promovendus bij het Delft Center for Systems and Control, TU Delft, waar ze onderzoek verricht op het gebied van regeling van verkeersnetwerken.

[§]Prof. dr. ir. Bart De Schutter is hoogleraar Hybride Regeling en Intelligente Transportsystemen bij het Delft Center for Systems and Control en bij de vakgroep Transport en Logistiek, Faculteit 3mE, TU Delft.

de vaste groentijden over de hele dag, onafhankelijk van de drukte van het verkeer. Dit nadeel werd ondervangen door meerdere starre regelingen per dag te bepalen, waarbij op vaste tijdstippen handmatig of automatisch werd omgeschakeld van de ene naar de andere regeling. Een volgende stap was om deze veranderingen van regeling te laten afhangen van de verkeersdruk. Al deze regelingen worden regelingen van de eerste generatie genoemd.

De tweede generatie netwerkregelingen is gebaseerd op een ander principe. Deze generatie berekent en implementeert regelingen aan de hand van actuele gegevens en voorspellingen op basis van een model. Daarbij wordt geprobeerd het optimalisatiecriterium (meestal verliestijd en aantal stops) zo klein mogelijk te maken voor het gehele netwerk. Een bekend systeem dat deze regelfilosofie hanteert, is het Engelse SCOOT. Op basis van metingen en een simpel verkeersmodel berekent SCOOT voor alle kruispunten hoe de groentijden per kruispunt over de verschillende richtingen verdeeld moeten worden, rekening houdend met de aanliggende kruispunten. De huidige ontwikkelingen rond SCOOT richten zich op openbaar vervoer (onder meer busprioriteit), incidentdetectie en routegeleiding. Daarmee streeft men in feite naar een compleet verkeersmanagementsysteem voor stedelijke netwerken.

Ook in Nederland is ervaring met het SCOOT-systeem opgedaan: in het kader van het Tweede Structuurschema Verkeer en Vervoer is SCOOT in de stad Nijmegen geïmplementeerd. De start hiervan vond in 1991 plaats. In 1994 werd de eerste evaluatie uitgevoerd. Daarbij werd SCOOT vergeleken met een goed ingeregeld starregelsysteem. De belangrijkste conclusie met betrekking tot het verkeerskundig functioneren van SCOOT was dat de resultaten wisselend waren. In het algemeen was er ten opzichte van het starre regelsysteem geen duidelijke verbetering te meten: in bepaalde periodes en op bepaalde trajecten was SCOOT beter en in andere periodes en op andere trajecten presteerde SCOOT juist slechter. Dat leidde tot de opzet van een tweede evaluatieproject, waarbij ook enkele wegvakken opnieuw ingeregeld werden. De resultaten van deze evaluatie waren een stuk beter. SCOOT verkortte de reistijden flink ten opzichte van het starre regelsysteem (11%). Een variant van SCOOT, waarbij de hoofdrichting extra voordeel kreeg, deed het nog eens veel beter dan de gewone SCOOT (14% kortere reistijden).

Als laatste onderscheiden we een derde generatie netwerkregelingen. Het grootste verschil met regelingen van de tweede generatie is dat dit type geen gemeenschappelijke cyclustijd nodig heeft en dat het optimalisatieproces sneller plaatsvindt. Een voorbeeld hiervan is het Italiaanse UTOPIA-SPOT. Dit is een gedecentraliseerd verkeersregelsysteem, ontwikkeld voor Turijn, met de oorspronkelijke doelstelling om prioriteit aan het openbaar vervoer te geven en de verkeersafwikkeling van het overige verkeer voor alle verkeersomstandigheden te optimaliseren. Het systeem maakt onderscheid tussen twee niveaus: het kruispuntniveau en het netwerkniveau. Op kruispuntniveau wordt de toestand van het kruispunt bepaald en aan de hand daarvan wordt een zo goed mogelijke regeling toegepast. Ook wordt expliciet gekeken naar aanliggende kruispunten. Op netwerkniveau verzamelt men data en verwerkt deze tot informatie over intensiteiten en routes. Op basis van deze informatie wordt een netwerkcriterium (totale reistijd) geoptimaliseerd en worden de bijbehorende randvoorwaarden en doelen aan de lokale regelaars doorgegeven. Prioriteit voor het openbaar vervoer wordt gerealiseerd door de voertuigen te detecteren en op netwerkniveau de aankomsttijd op elk kruispunt te schatten. Deze informatie geeft men vervolgens door aan de lokale regelaars.

Ook in Nederland is UTOPIA-SPOT getest. In de loop van 1997 zijn in Eindhoven vijf kruispunten (op een zeer drukke route) voorzien van de benodigde hard- en software. Uit de evaluatie bleek dat de rijtijden voor het gewone verkeer in vergelijking met de oude situatie behoorlijk afnamen (met 21%). De situatie voor het openbaar vervoer bleef min of meer gelijk. Bij dit onderzoek kunnen wel kanttekeningen geplaatst worden. Zo heeft men niet een echt netwerk onderzocht: de kruispunten lagen op één lijn, een situatie die eenvoudiger te regelen is dan een netwerk. Bovendien was de

De geschiedenis van het verkeerslicht

Het verkeerslicht heeft een lange historie. Londen kan volgens verschillende bronnen bogen op het eerste verkeerslicht: in 1868 werd er een verkeerslicht met rode en groene gaslantaarns, door een politieagent met de hand bediend, in gebruik genomen. Het was bedoeld om parlementariërs een drukke straat te laten oversteken. Dit verkeerslicht was overigens geen lang leven beschoren, omdat het kort na de installatie explodeerde. Salt Lake City in de Verenigde Staten heeft weer de primeur voor het elektrische verkeerslicht, in 1912. In diezelfde stad kwamen in 1917 al elektrische, gecoördineerde verkeerslichten voor. In hoog tempo werden in de jaren twintig grote steden als New York uitgerust met verkeerslichten. In 1934 waren er in New York al 7.700 kruispunten met verkeerslichten geregeld.

Nederland maakt in de jaren twintig van de vorige eeuw kennis met het nieuwe instrument. In 1930 was er een verkeerslicht in Eindhoven en in 1936 wordt melding gemaakt van verkeerslichten in Amsterdam en worden de burgers in het Algemeen Handelsblad gemaand de signalen te gehoorzamen.

Een sprong voorwaarts in de toepassing van verkeerslichten kwam met de uitvinding van de computer. In 1952 werden in Denver analoge computers gebruikt om op basis van detectorinformatie uit een set regelingen de meest geschikte te kiezen. De eerste digitale computer voor het regelen van verkeer deed in 1959 zijn intrede in Toronto en is sindsdien niet meer weg te denken in dit vakgebied.

evaluatie zeer beperkt van opzet, omdat voor alle situaties slechts enkele dagdelen met elkaar zijn vergeleken. Ook is niet duidelijk hoe goed het oude regelsysteem functioneerde.

Conclusie bestaande netwerkregelingen

Als we de ervaringen met verkeersregelsystemen voor netwerken op een rijtje zetten, dan is het eerste dat opvalt de lange tijd die nodig is om een systeem te implementeren en vooral ook om het in te regelen. Een tweede aspect betreft de verkeerskundige resultaten. Deze zijn vaak wisselend. Uiteraard hangt dat ook sterk af van de uitgangssituatie. Is deze reeds goed geregeld en onderhouden, dan zal het moeilijk worden om daar verbetering in te brengen. Wel is duidelijk gebleken (bijvoorbeeld in Nijmegen) dat een real-time systeem beter reageert op de ontwikkelingen in het verkeer. Na twee jaar is het starre systeem slechter gaan presteren, terwijl het SCOOT-systeem ongeveer hetzelfde presteert. Dit reageren op veranderende omstandigheden in de verkeersstromen is een goede ontwikkeling. Nadeel is dat het systeem achter de feiten blijft aanlopen. De vraag is nu of er meer bereikt kan worden door niet te reageren, maar te anticiperen op ontwikkelingen in de verkeersstromen.

Anticiperend regelen

Het regelen van het verkeer en het gedrag van weggebruikers zijn twee processen die elkaar kunnen beïnvloeden. Deze twee processen hebben verschillende actoren die verschillende doelen hebben. De wegbeheerder heeft misschien als doel zo min mogelijk verliestijd in het netwerk of prioriteit voor bepaalde doelgroepen (bijvoorbeeld openbaar vervoer) en daarvoor zet hij maatregelen in als verkeerslichtenregelingen, toeritdoseringen of DRIP's. Weggebruikers hebben hun eigen doel, namelijk zo snel, goedkoop en comfortabel mogelijk van A naar B reizen. Beide doelen vallen vaak niet samen.

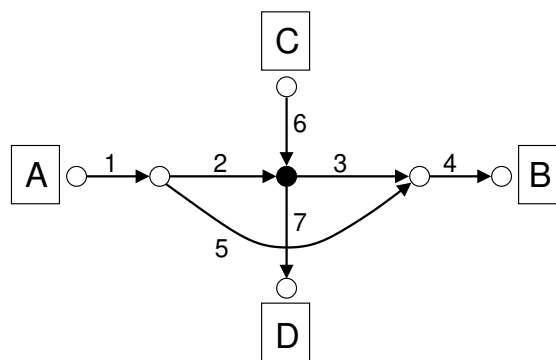
De manier van regelen door de wegbeheerder kan de keuzemogelijkheden van de weggebruikers (routekeuze, vertrektijdstipkeuze en misschien zelfs de keuze van modaliteit) tot op zekere hoogte

benvloeden. Een voorbeeld: als de verkeerslichtenregelingen op een bepaalde route zodanig worden aangepast dat wachtrijen verdwijnen en verliestijden op die route kleiner worden, dan trekt dat mogelijk verkeer van andere routes, waar nog steeds files staan. Dat kan weer tot gevolg hebben dat de wachtrijen die eerst verdwenen waren, weer terugkomen en dat verliestijden weer net zo lang zijn als voorheen. De vraag is dan of het netwerk als geheel geprofiteerd heeft van de maatregel. Een ander voorbeeld is de prioriteit voor openbaar vervoer bij geregelde kruispunten. Daardoor kan de verliestijd voor andere weggebruikers toenemen en kunnen deze weggebruikers een andere route, een ander tijdstip van vertrek of misschien zelfs een andere vervoerswijze kiezen.

Als wordt aangenomen dat wijzigingen in verkeersregelingen veranderingen in het keuzegedrag van weggebruikers tot gevolg hebben, is het nodig op deze veranderingen te anticiperen. Indien regelingen worden geoptimaliseerd (zo min mogelijk verliestijd bijvoorbeeld), dan moet daarbij dus rekening worden gehouden met de veranderingen in verkeersstromen die kunnen optreden als gevolg van de optimalisatie. Het regelprobleem kunnen we dan als volgt definiëren: het verkeer zodanig regelen dat een vooraf gespecificeerd doel wordt bereikt, rekening houdend met veranderingen in het keuzegedrag van weggebruikers.

Voorbeelden

Om te onderzoeken of anticiperend regelen beter is dan reactief regelen, kunnen allerlei voorbeelden gebruikt worden. In dit artikel gebruiken we een simpel voorbeeld (om het principe duidelijk te maken) en een wat ingewikkelder, realistischer voorbeeld. Anticiperend regelen wordt daarbij vergeleken met reactief regelen en met het systeemoptimum. Bij reactief regelen reageert de regelstrategie op de huidige verkeersstromen. Het systeemoptimum is die set van groentijden en routestromen die de laagste vertraging in het netwerk oplevert.

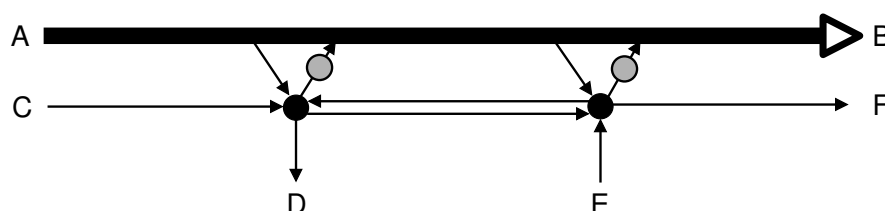


Bovenstaande figuur geeft het simpele voorbeeld weer. Verkeer gaat van A naar B en heeft de keuze tussen twee routes: een korte door de stad met een geregeld kruispunt en een langere route om de stad heen (met een hogere maximumsnelheid). Er gaat ook verkeer van C naar D om te kijken wat de effecten van de verschillende regelstrategieën op die zijrichting zijn. Beide verkeersstromen hebben een spitsprofiel: het verkeer neemt in de loop van de tijd toe en daarna weer af. Indien we kijken naar de totale vertraging in het netwerk, dan krijgen we de volgende resultaten.

	Netwerkvertraging (vrt.uren)
Reactief regelen	81,84
Anticiperend regelen	46,09
Systeem optimum	36,39

In vergelijking met reactief regelen kan anticiperend regelen de situatie dus nog verbeteren. Dit gebeurt door de verkeersstromen meer richting het systeemoptimum te regelen. De groentijd voor link 2 wordt kleiner gemaakt ten opzichte van die van 6 en daardoor wordt de reistijd via link 2 langer en gaan meer weggebruikers de route via link 5 rijden en dat is weer gunstiger voor verkeer van C naar D. In de volgende tabel staan de groentijden, intensiteiten en reistijden voor de drukste periode vermeld. Duidelijk te zien is dat met anticiperend regelen verkeer 'wordt gedwongen' de langere route te nemen. Dat is ook beter voor het systeem, zoals blijkt uit resultaten voor het systeemoptimum.

	Groentijd link 2 (sec)	Intensiteit link 2 (vrt/uur)	Reistijd via link 2 (min)	Reistijd via link 5 (min)
Reactief regelen	30,5	970	7,05	6,37
Anticiperend regelen	7,1	357	8,41	6,34
Systeem optimum	7,0	117	5,81	6,38



Het tweede voorbeeld betreft een snelweg met een parallelle stedelijke route — zie de tekening hier direct boven. Er zijn twee aansluitingen met twee geregelde kruispunten (zwarte knopen) en beide toeritten hebben toeritdosering (grijze knopen). Bij alle regelstrategieën wordt toeritdosering gebruikt. Bij reactief regelen is dat apart van de kruispunten bij een simpele doseerstrategie en bij anticiperend regelen is het doseren integraal onderdeel van de regelstrategie. Het resultaat voor wat de totale vertraging in het netwerk is als volgt:

	Netwerkvertraging (vrt.uren)
Reactief regelen	443,09
Anticiperend regelen	313,96
Systeem optimum	201,30

Uit deze tabel blijkt dat voor dit netwerk en de gebruikte verkeersstromen met anticiperend regelen de totale vertraging in het netwerk kleiner wordt en het systeemoptimum dichter benaderd wordt.

Conclusies

Netwerkregelingen waarin verkeerslichten in een stedelijk wegennetwerk met elkaar worden verknoot en in samenhang worden aangestuurd, kunnen de verkeersprestatie in het netwerk aanzienlijk verbeteren. Praktijktoeepassingen van real-time netwerkregelingen hebben gezorgd voor zo'n 11 tot 21% kortere reistijden in Nijmegen en Eindhoven. In dit artikel is met een simulatiestudie aangetoond dat anticiperende netwerkregelingen de verkeersprestaties nog verder kunnen verbeteren. Voor dergelijke netwerkregelingen moeten de bestaande verkeersregelininstallaties wel geschikt gemaakt worden. Dat kan bijvoorbeeld door het wel mogelijk te maken dat een centrale regeling ingrijpt op de lokale regeling, maar door tegelijkertijd de lokale intelligentie zoveel mogelijk te behouden.

Ook in regionale wegennetwerken — dus met rijkswegen en maatregelen als toeritdosering, dynamische snelheden en spitsstroken — kunnen netwerkregelingen de verkeersprestatie verbeteren. Hiervoor is het Model Predictive Control-concept, een real-time modelgebaseerde, voorspellende regelmethode, met name geschikt. Een simulatiestudie uit het AMICI-programma heeft laten zien dat hiermee effecten tot zo'n 5% vermindering van voertuigverliesuren in een regionaal netwerk mogen worden verwacht met alleen sturing door verkeerslichten (zie het aansluitende artikel hieronder). Het opnemen van ook andere maatregelen in een dergelijke netwerkregeling zal de positieve effecten zeker vergroten. Gebaseerd op modelstudies en beperkte empirische resultaten valt te verwachten dat deze effecten kunnen oplopen tot zo'n 15% vermindering van voertuigverliesuren in een regionaal netwerk.

Voordat kan worden overgegaan tot praktijkimplementatie van deze manier van regionale netwerkregeling is het wel nodig dat:

- doel- of kostenfuncties voor het regionale netwerk worden gedefinieerd die verkeerskundig werkbaar en bestuurlijk uitlegbaar en gedragen zijn;
- geschikte optimalisatieprincipes worden opgesteld, waarin wordt vastgelegd welke maatregelen onder welke omstandigheden kunnen en mogen worden ingezet (zoals dynamische snelheden);
- de netwerkregelaar sneller en betrouwbaarder kan worden gemaakt;
- de maatregelen in het netwerk geschikt worden gemaakt om opgenomen te worden in een regionale netwerkregeling.

De ontwikkelingen in een van de oudste vakgebieden op het gebied van verkeer staan dus niet stil, maar er blijft onderzoek nodig naar de beste manier om netwerken te regelen en alle verkeersdeelnemers zo goed mogelijk te laten doorstromen.

Verkeer regelen in gemengde netwerken

Samenvatting

In de hoofdtekst over anticiperende netwerkregelingen hebben we met name regelingen voor stedelijke netwerken beschouwd, waar verkeerslichten nog steeds de meest gebruikte maatregel zijn. Op snelwegen is de situatie natuurlijk anders: daar vinden we vooral maatregelen als toeritdosering, variabele snelheidslimieten en spitsstroken. Het programma AMICI onderzoekt daarom hoe verkeer in gemengde netwerken het beste kan worden geregeld.

AMICI is een NWO/VeV-onderzoeksprogramma. De afkorting staat voor Advanced Multi-agent Information and Control for Integrated multi-class traffic networks. Sinds de start van het programma in 2001 werken de AMICI-onderzoekers aan de ontwikkeling van middelen voor proactieve gecoördineerde en geïntegreerde dynamische verkeersbeheersing voor autosnelwegen en stedelijke wegennetwerken. Kennis over hoe de verkeersstromen veranderen als bepaalde verkeersinformatie wordt gegeven, hoe congestie zich binnen het netwerk verspreidt en welk effect beschikbare DVM-maatregelen hierop hebben, zijn hierbij essentieel.

Sterke wisselwerking

De onderlinge wisselwerking van het verkeer op de verschillende netwerken is sterk, met als gevolg dat maatregelen die op de snelweg worden genomen weliswaar resulteren in een verbeterde doorstroming op de snelweg maar mogelijk ook in langere wachtrijen op de toeritten. Deze wachtrijen kunnen kruispunten in het stedelijke netwerk blokkeren. Omgekeerd zijn stedelijke regelingen er vaak op gericht om voertuigen zo snel mogelijk uit de stad te leiden, waardoor files ontstaan op de omliggende snelwegen. De beschreven problemen tussen de twee verschillende soorten wegen worden soms versterkt door het feit dat lokale wegen en snelwegen beheerd worden door verschillende instanties, vaak met elk hun eigen beleid en doelstellingen.

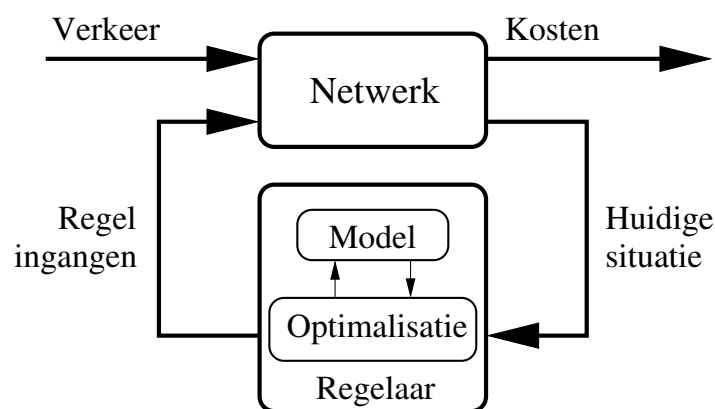
Model Predictive Control

Met een gecoördineerde aanpak van de problemen kan de totale prestatie van het netwerk verhoogd worden. Daartoe is in AMICI een regelmethode ontwikkeld waarbij een geschikte afweging wordt gemaakt tussen de prestatie van het snelwegennetwerk en van het lokale netwerk, en die het verschuiven van de problemen tussen de twee zoveel mogelijk voorkomt.

Deze methode is gebaseerd op het zogenaamde Model Predictive Control (MPC)-concept, een real-time modelgebaseerde, voorspellende regelmethode. MPC is met name geschikt omdat het veranderingen in de verkeersvraag en in externe factoren eenvoudig kan onderkennen en afhandelen. Verder kan het omgaan met veel variabelen, hoeven er weinig parameters ingesteld te worden en kunnen beperkingen zoals maximum wachtrijen, maximum aantal keren stoppen of maximale vertraging, systematisch geïmplementeerd worden.

Het doel van MPC is het minimaliseren van een kostenfunctie over een gegeven voorspellingshorizon, gebruik makend van regelingen en een voorspellingsmodel. De kostenfunctie is doorgaans een afweging tussen verschillende indicatoren, zoals gemiddelde rijlengte, aantal voertuigverliesuren, totale vertraging, aantal keren stoppen, totale tijd in het netwerk, geluidsoverlast, brandstofverbruik, vervuiling enzovoort. Bovendien kan de afwikkeling op de verschillende delen van het netwerk verschillend gewaardeerd worden, waardoor bijvoorbeeld belangrijke (deel-) trajecten geprioriteerd kunnen worden. De regelingen bestaan uit instellingen voor de verkeerslichten, toeritdoseerinstallaties en snelheidslimieten, maar ook uit de te verschaffen verkeersinformatie.

Figuur 1 geeft de werking van MPC schematisch weer. Het verkeer rijdt het netwerk binnen, wat resulteert in een bepaalde prestatie van het netwerk over een zekere periode. Deze prestatie en de



Figuur 1: Overzicht Model Predictive Control.

huidige verkeerssituatie worden op een of andere manier gemeten, en doorgegeven aan de regelaar. De regelaar gebruikt een verkeersmodel om het verkeer te voorspellen en een optimalisatiealgoritme om real-time te bepalen wat de beste regelingen zijn voor de voorspelde periode. Bij MPC worden vaak macroscopische verkeersstroommodellen gebruikt (zoals METANET of FastLane) omdat deze een goede trade-off opleveren tussen nauwkeurigheid en rekensnelheid.

Als met dit algoritme de beste ingangen zijn gevonden voor deze hele periode, worden alleen de waarden die berekend zijn voor de eerste tijdstap hiervan, doorgegeven aan het echte netwerk. De volgende tijdstap begint het hele proces opnieuw ('rolling horizon'-aanpak), en wordt weer een periode vooruit voorspeld en geoptimaliseerd. Deze methode maakt het mogelijk om real-time de modelparameters aan te passen aan de gedane metingen, waardoor zowel variaties in verkeersvraag als in omgevingsfactoren automatisch meegenomen kunnen worden.

Case om de effecten van de regeling te illustreren

Om de werking van de MPC-regeling te illustreren, beschouwen we het verkeer in een klein netwerk (zie figuur 2). Het netwerk bestaat uit twee snelwegen, elk met twee toeritten en twee afritten. Verder zijn er twee grote kruisingen (A en C) die verbonden zijn met de snelwegen en met elkaar. Tussen deze kruisingen en de snelwegen zijn kleinere kruisende wegen (B, D en E), waar verkeer niet af kan slaan (zoals fiets- en of voetpaden). In de case worden drie scenario's beschouwd:

- **Scenario 1: File op de snelweg**

Er bevindt zich een file aan het einde van snelweg 1. Gedurende de simulatie propageert deze file tegen de rijrichting in over de snelweg, en blokkeert daarbij de toeritten. Het verkeer dat van deze toeritten gebruik wil maken, blokkeert daardoor de kruispunten in het stadsnetwerk.

- **Scenario 2: Ongeluk op een kruising**

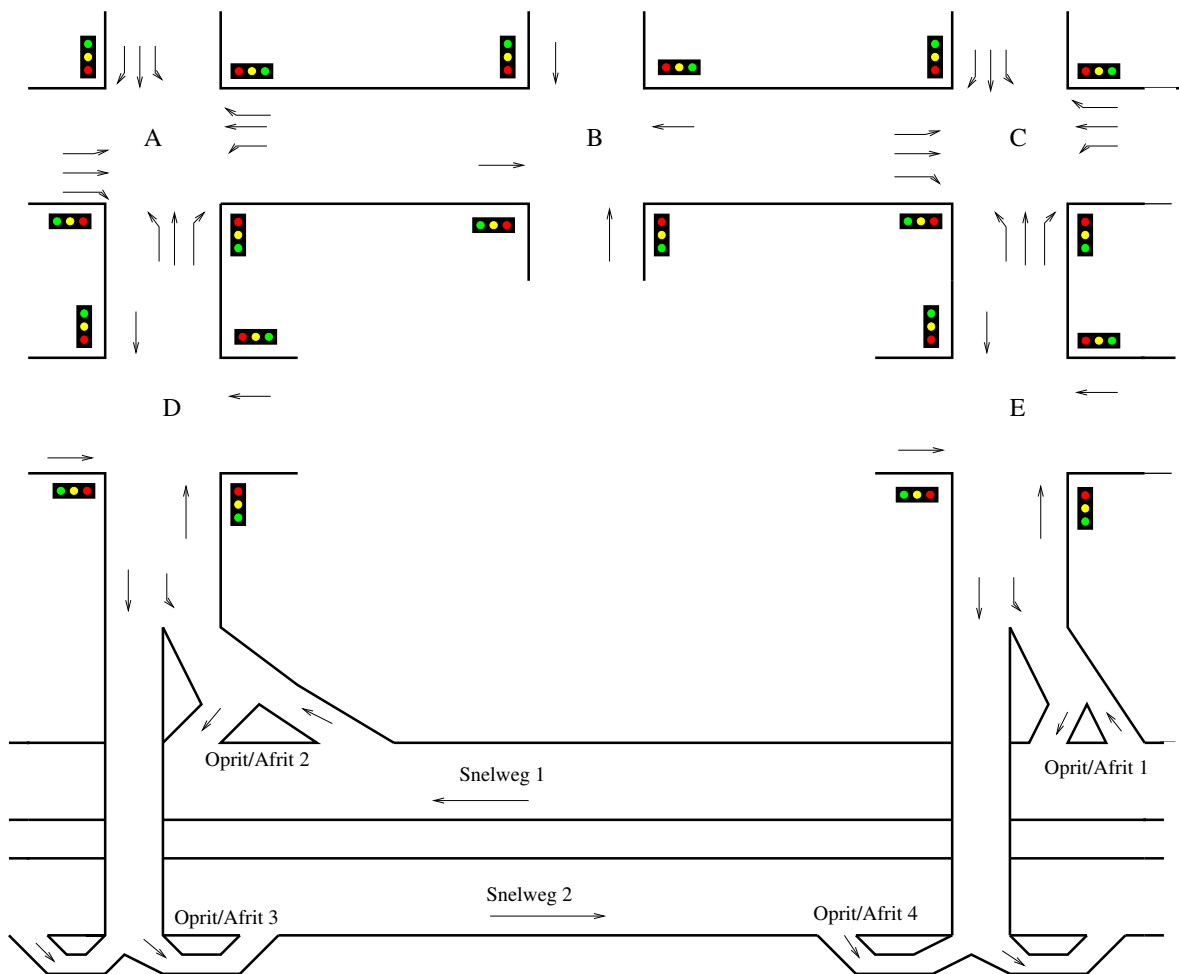
Op kruising D vindt een ongeluk plaats, waardoor hier geen verkeer meer kan passeren. Dit resulteert in lange wachtrijen in het stadsnetwerk, de afrit blokkeert en er ontstaat file op de snelweg.

- **Scenario 3: Spitsuur**

Gedurende het spitsuur is de verkeersvraag hoger, en is er meer verkeer richting de snelweg.

Als kostenfunctie is de totale tijd dat alle voertuigen in het netwerk zijn, geselecteerd. De regelingen zijn de instellingen van de verkeerslichten op de kruisingen. De resultaten van de simulaties zijn samengevat in tabel 1. Hierin staat de prestatie van het netwerk, gerealiseerd met MPC op de snelweg, in de stad en in totaal. Ter vergelijking zijn de resultaten opgenomen voor een regeling waarbij alle kruispunten lokaal geoptimaliseerd worden. De laatste kolom geeft de verbetering van MPC ten opzichte van deze lokale regeling weer.

Hoewel uit dit voorbeeld, en uit andere experimenten die de AMICI-onderzoekers hebben uitgevoerd, blijkt dat de op MPC gebaseerde regeling goede resultaten geeft, is verder onderzoek nodig. In het algemeen is het belangrijkste probleem op dit moment de benodigde rekentijd. De rekentijd voor de MPC-regeling is hoog door het gebruik van een centrale computer en door het feit dat een groot netwerk in één keer geoptimaliseerd wordt. Verder dient er gekeken te worden naar de betrouwbaarheid van de regelaar, met name naar de gevoeligheid voor meetfouten en storingen. Het verder in de praktijk uitwerken van MPC, inclusief het aantal benodigde metingen, benodigde infrastructuur en communicatiemogelijkheden, is een van de doelstellingen van de deelprojecten ATMO (Advanced Traffic Monitoring) en ATMA (Advanced Traffic Management) van het BSIK-programma TRANSUMO.



Figuur 2: Network gebruikt in het voorbeeld.

	snelweg MPC	stads MPC	totaal MPC	lokale regeling	lokale regeling
scenario 1	563,9	305,7	869,6	909	4,40%
scenario 2	495	620,3	1115,3	1163,9	4,20%
scenario 3	253,3	386,8	640,1	653,6	2,10%

Tabel 1: Resultaten van de simulaties

Totale tijd in het network (in voertuigen x uur) bij het gebruik van MPC (opgesplitst naar snelweg, stad, en totaal) en lokale optimalisatie, en de gerealiseerde verbetering van MPC ten opzichte van de lokale optimalisatie.