



Delft University of Technology

Coördinatie van maatregelen
State-of-the-Art achtergronddocument

van Katwijk, Ronald; Taale, Henk

Publication date
2012

Document Version
Final published version

Citation (APA)
van Katwijk, R., & Taale, H. (2012). *Coördinatie van maatregelen: State-of-the-Art achtergronddocument*. TrafficQuest.

Important note
To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy
Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*This work is downloaded from Delft University of Technology.
For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to a maximum of 10.*



Colofon

Auteurs	Ronald van Katwijk Henk Taale
Datum	24 oktober 2012
Versienummer	1.2
Uitgegeven door	TrafficQuest Expertisecentrum Verkeersmanagement Kluyverweg 4 2629 HT DELFT
Informatie	Henk Taale
Telefoon	+31 88 798 24 98

TrafficQuest is een samenwerkingsverband van

TNO innovation
for life

TUDelft



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Coördinatie van Maatregelen

State-of-the-Art
Achtergronddocument

24 oktober 2012

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	5
1. Waar hebben we het over?	7
1.1. Reactief regelen met redeneerregels	7
1.2. Voorspellend regelen.....	8
2. Hoever zijn we in Nederland?	10
2.1. Coördinatie van verkeersregelininstallaties	10
2.2. Coördinatie van toeritdoseerinstallaties	12
2.3. Coördinatie van snelheidsbeïnvloedende maatregelen	13
2.4. Coördinatie van route-informatiepanelen	14
2.5. Integrale maatregelcoördinatie	15
3. Hoe ver is men elders?	17
3.1. Coördinatie van verkeersregelininstallaties	17
3.2. Coördinatie van toeritdoseerinstallaties	22
3.3. Integrale maatregelcoördinatie	24
4. Wat hebben we eraan?	26
5. Waar gaan we naar toe?	27
Literatuur	28

Voorwoord

TrafficQuest inventariseert doorlopend de stand van zaken met betrekking tot verkeersmanagement en de richting waarin ontwikkelingen plaatsvinden. Verkeersmanagement staat nog maar aan het begin van veel veranderingen. Allerlei ontwikkelingen zullen het mogelijk maken verkeersmanagement effectiever, proactiever en netwerkbreed toe te passen. Daarvoor is verder onderzoek nodig. In het boekje "De toekomst van verkeersmanagement" wordt daarom een onderzoeksagenda gepresenteerd. Dit boekje is te vinden op de TrafficQuest website (www.traffic-quest.nl).

Bij het schrijven van dit boekje, heeft TrafficQuest veel achterliggend materiaal over allerlei aspecten van verkeersmanagement verzameld. Dit materiaal wordt in een reeks van rapporten gepubliceerd worden. Deze rapporten volgen steeds het stramien:

- Waar hebben we het over?
- Hoeveel zijn we in Nederland?
- Hoeveel zijn ze elders?
- Wat hebben we eraan?
- Waar gaan we naar toe?

Dit rapport behandelt deze vragen voor het onderwerp *coördinatie van maatregelen*.

1. Waar hebben we het over?

Als gevolg van de toenemende congestie en de scherpere randvoorwaarden aan het verkeerssysteem voor doorstroming, veiligheid en luchtkwaliteit, zal het aantal verkeersmanagementmaatregelen almaar toenemen. Echter, hoe dichter het netwerk van maatregelen wordt, hoe groter de kans dat maatregelen elkaar in hun werking beïnvloeden. De overgrote meerderheid van de in Nederland ingezette maatregelen, waaronder dynamische route-informatiepanelen, verkeersregelen toeritdoseerinstallaties, functioneren volledig autonoom. Lokale verstoringen in de afwikkeling van het verkeer worden afgehandeld zonder een beroep te doen op andere verkeersmanagementinstrumenten en zonder de hulp in te roepen van een hoger verkeersmanagementniveau. Dit autonoom functioneren is op zich een goede eigenschap: de maatregel kan snel op verstoringen reageren. De keerzijde is echter dat een effectieve werking van het netwerk als geheel niet kan worden gegarandeerd. Om een effectieve werking van het netwerk als geheel wel te kunnen garanderen, is vereist dat de inzet van maatregelen op elkaar wordt afgestemd. Vooral in stedelijke gebieden is dat belangrijk. De met verkeerslichten geregelde kruispunten liggen daar vaak zo dicht bij elkaar, dat de verkeersvraag op een kruispunt wordt beïnvloed door de verkeerslichtenregeling op één of zelfs meerdere naburige kruispunten.

Begin jaren tachtig van de vorige eeuw werd online netwerkmanagement van verkeersregelingen realiteit als gevolg van de ontwikkeling van SCOOT en SCATS. Waar in de beginjaren de verkeersregelingen slechts met een beperkte frequentie en voor een beperkt aantal regelparameters konden worden bijgesteld, zijn deze netwerkregelingen in een aantal generaties steeds verder geëvolueerd. Intussen wordt al gesproken over de vierde generatie systemen. Een netwerk houdt echter niet op aan de randen van de stad en wordt ook niet alleen door verkeerslichten geregeld. Er is dan ook een groeiende behoefte aan integraal netwerkmanagement. Verwacht mag worden dat integraal netwerkmanagement, dat zowel het stedelijke als het hoofdwegennet bestrijkt, nog een verdere winst kan opleveren voor doorstroming, veiligheid en luchtkwaliteit.

Er zijn vele manieren denkbaar waarop invulling kan worden gegeven aan de gecoördineerde inzet van verkeersmanagementmaatregelen in een netwerk. In eerste instantie wordt meestal voor een pragmatische, reactieve en op redeneerregels gebaseerde, aanpak gekozen. Daarna wordt stap voor stap naar een steeds geavanceerdere, proactieve en modelgebaseerde aanpak toegewerkt. Hieronder wordt in het kort een beeld geschetst van beide aanpakken. Het betreft hier in beide gevallen uitersten. In de praktijk heeft iedere aanpak verschillende verschijningsvormen en worden beide aanpakken in de praktijk ook meestal vermengd. Het hieronder geschetste beeld is dan ook vooral bedoeld als referentiekader voor lezing van dit document.

1.1. Reactief regelen met redeneerregels

Dit is de meest simpele manier van regelen. Op basis van de huidige toestand, de stand van de maatregelen en andere informatie worden met logische redeneerregels (bv. in de vorm van IF ...

THEN ... ELSE) maatregelen aangestuurd. Deze logische redeneerregels worden idealiter opgesteld op basis van algemene verkeerskundige principes en lokale domeinkennis. De logische redeneerregels reflecteren impliciet een mentaal verkeerskundig model: gegeven een bepaalde verkeersstand, hoe zou deze zich verder kunnen ontwikkelen en wat voor maatregelen zouden genomen kunnen worden om deze ontwikkeling in positieve zin te beïnvloeden.

Deze manier van regelen vereist een goede lokale domeinkennis. Aangezien de redeneerregels op basis van ervaring worden opgebouwd is het als zodanig minder geschikt voor situaties die zich nog niet eerder hebben voorgedaan.

Voordelen

- Vereist geen expliciet verkeersmodel.
- Maakt goed gebruik van lokale kennis.
- De regelmethode is eenvoudig te begrijpen en ook de regeldoelen en randvoorwaarden zijn op een begrijpelijke manier te verwerken.

Nadelen

- Niet iedere situatie wordt afgedekt.
- Invulling van de regeleenheid is zeer specifiek voor het doelgebied.
- Vaststelling van de juiste set van redeneerregels vergt veel tijd.

1.2. Voorspellend regelen

De beste manier voor het regelen van een netwerk is met Model Predictive Control (MPC). Uitgaande van de toestand in het netwerk en de huidige stand van de maatregelen wordt met een model een voorspelling gemaakt van de situatie in het netwerk over een bepaalde periode, bijvoorbeeld een half uur. Daarna wordt met een optimalisatieproces de stand van de maatregelen bepaald, zodanig dat daarmee een doelfunctie wordt geoptimaliseerd. Modellen verschillen onderling voor wat betreft hun architectuur, optimalisatiemethode, het aantal parameters dat geoptimaliseerd kan worden en hoe vaak deze kunnen worden aangepast. De gemaakte keuzen beïnvloeden de schaalbaarheid en de kwaliteit van de oplossing. Kort samengevat komt het er op neer dat geen enkele oplossing het in alle situaties even goed zal doen als gevolg van tijdens het ontwerp gemaakte keuzen. Een systeem dat de aansturing van de verkeersregelingen vanuit een centrale aanstuurt kan in principe een optimale instelling van de regelingen gegarandeerd worden. Echter als gevolg van vertragingen in de communicatie en de rekentijd welke benodigd is om grote netwerken door te rekenen zijn deze nieuwe instellingen feitelijk al verouderd. Indien de nieuwe instellingen dichtbij op het vuur, dus dichtbij de regeling, worden bepaald, zijn de instellingen actueler, maar omdat lokaal niet het hele netwerk overzien kan worden, minder nauwkeurig.

Voordelen

- Een echte manier om maatregelen integraal en (deel)netwerkbreed te coördineren.

- Geschikt voor alle situaties, ook incidenten en evenementen.
- Alle regeldoelen en randvoorwaarden zijn in te brengen, maar er kan ook gericht van afgeweken worden als dat voor het deelnetwerk nodig is.

Nadelen

- Er is een dynamisch verkeersmodel nodig om te kunnen voorspellen en optimaliseren. En dat betekent dus ook invoer, zoals een netwerk, een HB-matrix en maatregelen.
- Er is een manier nodig om de maatregelen te kunnen te optimaliseren met behulp van een model.

2. Hoever zijn we in Nederland?

Veel praktijkvoorbeelden van maatregelcoördinatie, zowel in Nederland als elders, hebben betrekking op de coördinatie van maatregelen van hetzelfde type. Een verklaring hiervoor is dat maatregelen van een verschillend type veelal beheerd worden vanuit verschillende systemen en verschillende organisaties of organisatieonderdelen. Het aantal te nemen technische en organisatorische horden alvorens coördinatie van maatregelen van verschillende types kan worden overgegaan is daarmee groter.

Hieronder wordt eerst voor een aantal specifieke maatregeltypen beschreven hoe maatregelcoördinatie in Nederland nu vormgegeven wordt. Vervolgens wordt hetzelfde voor integrale maatregelcoördinatie gedaan. De volgende secties worden onderscheiden:

- Coördinatie van verkeersregelinstallaties;
- Coördinatie van toeritdoseerinstallaties;
- Coördinatie van snelheidsbeïnvloedende maatregelen;
- Coördinatie van route-informatiepanelen;
- Integrale maatregelcoördinatie.

2.1. Coördinatie van verkeersregelinstallaties

Groene golven

Het Nederlandse verkeerskundige begrip groene golf wordt gebruikt om aan te geven dat weggebruikers langs hun route meerdere verkeerslichten kunnen passeren zonder te hoeven stoppen. In de meeste gevallen hebben groene golven de vlotte doorstroming van het gemotoriseerde verkeer op een corridor voor ogen, maar ook groene golven voor het fietsverkeer komen voor. Het groen slaat in dit geval op de kleur dat het verkeerslicht heeft bij nadering van een kruispunt. In het Engels spreekt men van de synchronisatie van verkeerslichten ('synchronized signals'). Buiten Nederland roept het begrip green wave eerder een milieuvriendelijker beeld op.

Realisatie van een groene golf vindt doorgaans plaats door de cyclus (de tijd waarin door het verkeerslicht aan alle verschillende richtingen groen wordt gegeven) van de verkeerslichten aan elkaar te koppelen en aan te passen aan de gemiddelde reistijd. Een groene golf kan meerdere doelen dienen. Allereerst is er natuurlijk het reistijdvoordeel voor de doorgaande verkeersstroom. Daarnaast worden groene golven ook steeds vaker toegepast om het milieu en de leefomgeving te sparen, doordat het doorgaande verkeer als gevolg van de groene golf minder hoeft af te remmen en op te trekken. In geval van een groene golf krijgen de voordelen voor het doorgaande verkeer veelal de aandacht. Voor het dwarsverkeer heeft een groene golf echter vooral nadelen.

Om een groene golf te kunnen realiseren moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan. Een duidelijke doorgaande hoofdstroom is bijvoorbeeld vereist. Voor veel kruispunten geldt echter dat deze ontbreekt en dat de verkeersvraag min of meer evenredig verdeeld is over de verschillende

richtingen. In dat geval wegen de voordelen voor het verkeer dat van de groene golf gebruik kan maken niet op tegen de nadelen voor het overige verkeer. Daarnaast mag de afstand tussen de kruispunten niet te groot zijn, omdat de pelotons met vertrekkende voertuigen tussen de kruispunten teveel uiteenvallen en er bij het stroomafwaartse kruispunt teveel groentijd verloren gaat bij de afwikkeling van dit verspreide verkeer. Om weggebruikers te informeren over de aanwezigheid van de groene golf en het van de weggebruiker gewenste gedrag om van de groene golf gebruik te maken kan een snelheidsadvies worden verstrekt. In het door DTV consultants ontwikkelde systeem ODYSA worden snelheidsadviezen onder andere ingezet om groene golven mogelijk te maken op strengen waarbij de afstand tussen de kruispunten voor een reguliere groene golf te groot zijn.

ODYSA

Voertuigen die uit de wachtrij voor een verkeerslicht vertrekken, vormen bij vertrek een hecht peloton voertuigen. Naarmate de tijd verstrijkt en het peloton een grotere afstand overbrugt, valt het peloton steeds verder uiteen tot alleen de losse voertuigen overblijven en er geen clusters van voertuigen kunnen worden onderscheiden. Dit is het gevolg van de interactie tussen de voertuigen en de verschillen in wensnelheid tussen de voertuigen. Het door DTV consultants ontwikkelde systeem ODYSA maakt gebruik van dynamische snelheidsadviezen om vertrekkende pelotons van voertuigen over een langer traject bij elkaar te houden of samen te voegen. Een groene golf kan dan ook gerealiseerd worden bij grotere kruispuntafstanden. Binnen ODYSA worden daarnaast ook snelheidsadviezen aan weggebruikers komende vanuit de zijstraten verstrekt, zodat ook deze weggebruiker bij het volgende kruispunt ongehinderd kunnen doorrijden. De door ODYSA bepaalde snelheidsadviezen kunnen zowel in het voertuig als langs de weg worden verstrekt. Het aantal signaalgevers is daarbij afhankelijk van de afstand tussen de kruispunten.

SCOOT

In het kader van het Tweede Structuurschema Verkeer en Vervoer is onderzoek uitgevoerd naar de toepassing van verkeersregelstrategieën die zich richten op het zo goed mogelijk benutten van de capaciteit van het stedelijke en het hoofdwegennet. Daartoe is het SCOOT systeem in Nijmegen geïmplementeerd en geëvalueerd [Middelham & Taale, 1996]. De eerste evaluatie liet zien dat de resultaten met betrekking tot het verkeerskundig functioneren van SCOOT wisselend waren. In het algemeen was er ten opzichte van het oude, 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 het starre regelsysteem. De tweede evaluatie liet zien dat SCOOT beter anticipeert op de ontwikkelingen in het verkeer. Na twee jaar was het starre systeem slechter gaan presteren, terwijl SCOOT ongeveer hetzelfde presteerde, dus relatief beter. De proef met SCOOT liet ook zien dat real-time systemen gevoelig zijn voor de instellingen van de parameters. Het inregelen van dergelijke systemen vergt dan ook veel inspanning [Taale et al, 1997].

TOPTRAC

TOPTRAC (Trend Optimizing Traffic Control) is een door TPA (thans: Vialis) ontwikkelde netwerkregeling van de tweede generatie. Netwerkregelingen van de tweede generatie berekenen en implementeren regelingen aan de hand van actuele gegevens en voorspellingen op basis van een model. In geval van TOPTRAC bestaan de actuele gegevens uit de aantallen voertuigen die voor

alle richtingen gedurende de laatste twee cycli op basis van de bestaande detectie geteld zijn. Het door TOPTRAC gebruikte model is een realtime variant van TRANSYT. Het model wordt gebruikt om een set maatregelinstellingen te bepalen waarbij de waarde voor een vooraf gekozen optimalisatiecriterium (meestal verliestijd of aantal stops) zo klein mogelijk te maken voor het hele netwerk. Een bekend systeem dat dezelfde regelfilosofie hanteert, is het Engelse SCOOT.

UTOPIA-SPOT

UTOPIA-SPOT is een door Mizar Automazione ontwikkelde netwerkregeling welke in Nederland tot voor kort actief vermarkt werd door Peek Traffic. Het moederbedrijf van Mizar Automazione, SWARCO, is sinds kort eveneens actief op de Nederlandse markt. UTOPIA-SPOT is een regeling van de derde generatie. Netwerkregelingen van de derde generatie onderscheiden zich van regelingen van de tweede generatie doordat de optimale set maatregelinstellingen vaker en fijnmaziger kunnen worden bepaald.

ImFlow

Peek en Imtech hebben sinds kort een eigen netwerkregeling op de markt gebracht onder de naam ImFlow. Een van de belangrijke verkoopargumenten achter de netwerkregeling is dat het met ImFlow makkelijker is om direct naar beleidsdoelen te optimaliseren. Het systeem is door Peek zelf beproefd in Helmond met goede resultaten. Over de werking van ImFlow is op dit moment nog niet veel bekend.

2.2. Coördinatie van toeritdoseerinstallaties

Er zijn een aantal redenen om toeritdoseerinstallaties te coördineren. Coördinatie is zinvol wanneer een enkele toeritdoseerinstallatie niet in staat is de instroom op het hoofdwegennet voldoende te doseren. Dit wordt veelal veroorzaakt doordat de beschikbare opstelruimte op de toerit volloopt en de wachtrij dreigt terug te slaan op het onderliggend wegennet. Een andere oorzaak kan zijn dat de verkeersstroom op het hoofdwegennet van zichzelf al groter is dan de capaciteit van een stroomafwaarts knelpunt. In dat geval is een individuele toeritdoseerinstallatie niet in staat het verschil te maken. Een andere reden waarom coördinatie zinvol is, is om zodoende de pijn wat beter te verdelen. In de literatuur worden verschillende strategieën voor de coördinatie van toeritdoseerinstallaties beschreven, waaronder model gebaseerde strategieën en regelgebaseerde strategieën. Hierover later meer in het volgende hoofdstuk 'Hoever zijn ze elders?'. In Nederland is nog geen praktijkervaring voor wat betreft de coördinatie van toeritdoseerinstallaties. Daarentegen is de ring rond Amsterdam wel veelvuldig in (internationale) modelstudies gebruikt als proefgebied voor gecoördineerde toeritdosering. De coördinatie van de toeritdoseerinstallaties was één van de voorgestelde onderdelen van de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam (zie paragraaf 'Integrale maatregelcoördinatie').

2.3. Coördinatie van snelheidsbeïnvloedende maatregelen

In Nederland is sinds de jaren tachtig van de vorige eeuw op ongeveer 1000 kilometer van het autosnelwegennet verkeerssignalering aangebracht [RWS, 2007]. Het betreft hier vooral de drukste gedeelten van het netwerk. Verkeerssignalering waarschuwt de automobilist bij nadering van een file of ander incident. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van knipperende lampen in de hoeken van de signaalgever. Naast dat verkeerssignalering een waarschuwing kan afgeven aan het naderende verkeer kan het naderend verkeer tevens dynamisch een andere maximum snelheid worden opgelegd. Voorts maakt het verkeerssignaleringssysteem het mogelijk rijstroken te sluiten.

Automatische Incident Detectie (AID)

Verkeerssignalering waarschuwt de automobilist bij nadering van een file of ander incident [Jenezon *et al*, 1987]. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van knipperende lampen in de hoeken van de signaalgever. Naast dat verkeerssignalering een waarschuwing kan afgeven aan het naderende verkeer, kan het naderend verkeer tevens dynamisch een andere maximum snelheid worden opgelegd. Voorts maakt het verkeerssignaleringssysteem het mogelijk rijstroken te sluiten.

Door middel van lussen die per rijbaan om de paar honderd meter in het wegdek zijn aangebracht worden de intensiteiten en snelheden bepaald per rijstrook. Door middel van algoritmes worden op een decentrale manier de benodigde ingrepen bepaald en aan displays aan de portalen boven de weg doorgegeven. De verkeerscentrale kan hierop zo nodig handmatig ingrijpen.

Op een klein aantal trajecten zijn voor- en nastudies verricht om de impacts van de verkeerssignalering te bepalen. Daarnaast is een groter aantal wegvakken met en zonder verkeerssignalering vergeleken op het punt van maximale verkeersintensiteit. Uit de diverse studies bleek dat (voor de situatie met verkeerssignalering vergeleken met de situatie zonder verkeerssignalering):

- a. De capaciteit van de wegvakken en de doorstroming onder reguliere condities (dat wil zeggen zonder ongevallen of andere incidenten) met ongeveer 5% toeneemt;
- b. Het aantal primaire ongevallen met 15%-45% en het aantal secundaire ongevallen met ca. 35% afneemt;
- c. Het aantal schokgolven met circa 50% afneemt.

SPECIALIST

Het SPECIALIST algoritme is gericht op het oplossen van filegolven [Hegyi *et al*, 2008]. De uitstroom van filegolven, aan de kop van de file, wordt bepaald door de maximale uitstroom die uit stilstaand verkeer te bereiken is. Deze bedraagt ongeveer 70% van de normale capaciteit van de snelweg. SPECIALIST lost filegolven op door de maximumsnelheid stroomopwaarts van de file naar beneden bij te stellen, zodat de aangroei van de file wordt vertraagd en zo eerder kan oplossen. Als het algoritme een filegolf detecteert, wordt eerst bepaald of deze filegolf oplosbaar is. Dit is onder meer afhankelijk van de lengte van het traject en de mate van opvolging van de verlaagde limiet. SPECIALIST is getest op de A12 tussen Bodegraven en Woerden in een praktijkproef met dynamische maximumsnelheden [Burgmeijer *et al*, 2011]. De maximumsnelheid werd hier in geval van een schokgolf stroomopwaarts verlaagd van 120 km/u naar 60 km/u (met stappen van 20

km/u). De getoonde limieten zijn bijzonder dynamisch. De 100 en 80 km/u limieten worden zeer kort getoond – echter lang genoeg voor weggebruikers om altijd een 100 of 80 km/u limiet tegen te komen voordat ze een 60 km/u limiet zien. De snelheidslimiet van 60 km/u wordt wat langer getoond. De meeste ingrepen betreffen korte files met een tijdsduur van enkele minuten en een lengte van enkele kilometers.

Uit de evaluatie van deze praktijkproef is gebleken dat het SPECIALIST algoritme in de proefperiode gemiddeld 1,6 keer per dag ingegrepen heeft, waarvan in 48% van de gevallen voor een filegolf. Het relatief grote aantal activeringen voor niet-filegolven komt o.a. door een defecte meetlus (op km 39,65) en doordat het moeilijk is om onderscheid te maken tussen een staande file en een filegolf op het moment dat de file net is ontstaan. Tegelijkertijd is het belangrijk om de filegolf zo snel mogelijk te detecteren en zo snel mogelijk in te grijpen en daarom zijn de onbedoelde activeringen geaccepteerd als neveneffect. Het algoritme greep gemiddeld één keer op de tien filegolven in, waarvan ongeveer 80% is opgelost. In totaal neemt het aantal filegolven dus af met 8%. Van de overige ingrepen is ongeveer 40% opgelost. Gemiddeld wordt per ingreep (filegolven plus andere verstoringen) een winst van 18 voertuigverliesuren behaald. Elke opgeloste filegolf betekent een vermindering van 39 voertuigverliesuren. Het SPECIALIST algoritme zorgt dus voor een verbetering van de doorstroming. Ook blijkt uit de metingen dat het activeren van het algoritme geen nieuwe filegolven of andere files veroorzaakt of doet toenemen.

2.4. Coördinatie van route-informatiepanelen

In de proof of concept van de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam (zie de paragraaf 'Integrale maatregelcoördinatie') wordt coördinatie van route-informatiepanelen voorgesteld, als onderdeel van de realisatie van lokale verkeersmanagementmaatregelen. Het ging hierbij om het plaatsen van (berm-) DRIP's en de plaatsing van dWiSta-borden (Dynamische Wegweiser met integrierten Stauinformationen).

De belangrijkste functie van (berm-) DRIP's is het rerouten van verkeer. Dit kan zowel door te informeren als door het gerichter en dwingender geleiden en sturen van verkeer. Hierbij is een onderscheid te maken van het rerouten op afstand en in de nabijheid van het probleemgebied. Er zijn DRIP's (waaronder ook berm DRIP's) voor rijkswegen, regionale en het stedelijke wegennet. De DRIP's zullen verschillende soorten informatie verschaffen aan weggebruikers en deze informatie zal grafisch of in teksten worden gepresenteerd. Voor de niet-reguliere situaties worden extra DRIP's geplaatst op de rijkswegen en op het stedelijk wegennet in de omgeving van de A10 zuid.

Het plaatsen van dWiSta-borden is een maatregel die in het kader van de Praktijkproef is voorgesteld. Het dWiSta-concept komt oorspronkelijk uit Duitsland. Het gaat om een combinatie van informatie via vaste panelen en dynamische informatie, zoals die ook gegeven wordt met DRIP's. Met het dWiSta-concept wordt route-informatie directer gekoppeld aan de rijtaak. Praktijkervaringen in Duitsland laten zien dat een directe koppeling van route-informatie en richting- c.q. rij-

strookkeuze een significante verbetering van de opvolging van het routeadvies geeft. In Duitsland worden de dynamische informatiemogelijkheden gebruikt voor informatievoorziening aan weggebruikers bij verstoringen. Als er geen verstoring is, blijft het bord leeg. In de Praktijkproef werd een bredere toepassing voorgesteld, om grotere effecten te kunnen realiseren. Zo wordt ook in reguliere situaties, bij inzet als lokale maatregel, informatie verschaft over reistijden op alternatieve routes. Het dWiSta-concept bestaat uit een aantal panelen dat op een traject worden aangebracht. In de Proof of Concept voor de praktijkproef zijn twee dWiSta locaties verkeerskundig uitgewerkt. De kans is overigens klein dat deze dWiSta-borden ook daadwerkelijk gerealiseerd worden.

2.5. Integrale maatregelcoördinatie

Verkeersmanagement is in Nederland gemeengoed geworden, maar tot nu toe zijn vooral lokale maatregelen geïmplementeerd. Ook in het huidige programma voor benutting 'Beter Benutten' gaat het vooral om lokale maatregelen, alhoewel er wel aandacht is voor regelscenario's.

Vooralsnog vindt netwerkmanagement in Nederland dus plaats op basis van regelscenario's: vooraf gedefinieerde draaiboeken waarin precies is vastgelegd wanneer en hoe een bepaalde set van maatregelen wordt ingezet. Deze aanpak gebaseerd op regelscenario's is in vrijwel alle gevallen realiseerbaar. Deze vorm van integraal netwerkmanagement kent sterke parallellen met de eerste generatie stedelijk netwerkmanagement en laat het nog niet toe om maatregelen fijnmazig op elkaar af te stemmen. Eén van de belangrijkste beperkingen van een op regelscenario's gebaseerde aanpak is echter dat het nooit mogelijk is om alle denkbare relevante situaties die zich in een netwerk kunnen voordoen met behulp van regelscenario's af te dekken.

Om het werken met regelscenario's te vergemakkelijken zijn in Nederland een aantal systemen ontwikkeld. In eerste instantie in eigen beheer of in opdracht van een wegbeheerder, waaronder systemen zoals BOSS (ten behoeve van de verkeerscentrales van Rijkswaterstaat) en de Scenario-Manager (regionaal in Noord Holland). In tweede instantie ook door de markt, waaronder systemen als MobiMAESTRO (Technolution) en ViValdi (Vialis). Voor alle systemen geldt dat de regelscenario's handmatig moeten worden gedefinieerd en dat deze door de systemen niet handmatig kunnen worden gegenereerd of geleerd.

Het aantal regelscenario's kan in potentie heel groot worden. In Noord-Holland werkt de Scenario-Manager daarom met zgn. "bouwblokken" in deelnetwerken waardoor het grote aantal mogelijke scenario's in een netwerk gereduceerd wordt. Noemenswaardig is ook de Praktijkproef Amsterdam, een regionaal initiatief in en rondom Amsterdam, wat tot doel had en heeft om de haalbaarheid en de realiseerbaarheid van o.a. integrale maatregelcoördinatie in de praktijk te kunnen beproeven.

Binnen de Praktijkproef Amsterdam werd naar oplossingen voor verkeersproblemen gezocht vanuit het principe 'lokaal waar mogelijk, opschalen wanneer nodig'. Uitgangspunt achter dit principe is

dat de complexiteit van netwerkmanagement één op één samenhangt met de complexiteit van knelpunten in het netwerk. In geval van lokale knelpunten in de verkeerstoestand kan dus worden volstaan met de inzet van individuele regeleenheden. Gaan de knelpunten in de verkeerstoestand elkaar echter beïnvloeden, dan moet op een hoger geografisch niveau worden geregeld: eerst op trajectniveau, vervolgens op deelnetwerkniveau en uiteindelijk op netwerkniveau. Andersom vallen knelpunten op zeker moment als gevolg van goed netwerkmanagement en een afnemende verkeersvraag uit elkaar in kleinere knelpunten die (weer) op de lagere geografische niveaus kunnen worden geregeld: van netwerkniveau terug naar deelnetwerkniveau, naar trajectniveau en uiteindelijk naar puntniveau. Dit *opschalen* verloopt via het volgende basisprincipe: wanneer er onvoldoende ruimte is om het probleem op te lossen op het huidige niveau, dan wordt er opgeschaald naar een hoger niveau. Het *terugschalen* verloopt via het omgekeerde principe: wanneer op een lager niveau weer voldoende ruimte is om het probleem op te lossen, dan wordt er naar dit lagere niveau teruggeschakeld.

3. Hoe ver is men elders?

3.1. Coördinatie van verkeersregelininstallaties

Begin jaren tachtig van de vorige eeuw werd online netwerkmanagement van verkeersregelingen realiteit als gevolg van de ontwikkeling van SCOOT en SCATS. Waar in de beginjaren de verkeersregelingen slechts met een beperkte frequentie en voor een beperkt aantal regelparameters konden worden bijgesteld, zijn deze netwerkregelingen in een aantal generaties steeds verder geëvolueerd. Intussen wordt al gesproken over de vierde generatie systemen. Hieronder volgt een korte beschrijving van de voor online netwerkmanagement van verkeersregelingen meest gangbare systemen:

- Italië – UTOPIA/SPOT
- Duitsland – MOTION
- Duitsland – BALANCE
- Frankrijk – PRODYN
- Australië – SCATS
- Groot-Brittannië – SCOOT
- Griekenland – TUC

Italië – UTOPIA/SPOT

UTOPIA/SPOT (Urban Traffic Optimization by Integrated Automation/Signal Progression Optimization Technology) is een regelstrategie voor VRI's, ontwikkeld door Mizar Automazione uit Turijn, Italië [Mauro & Di Taranto, 1989]. Om te regelen op grootschalige netwerken bestaat UTOPIA/SPOT uit twee modules waarvan er één (UTOPIA) draait op een centrale computer voor het hele gebied en één draait (SPOT) op de computers op lokaal (kruispunt) niveau. UTOPIA/SPOT wordt gebruikt in meerdere steden in onder andere Nederland, Italië, de VS, Zweden, Noorwegen, Finland, Denemarken en Groot-Brittannië.

De SPOT-module is een optimalisatiemodule voor een individuele VRI. SPOT bepaalt een reeks van lichtbeelden (fasen) welke over een bepaalde tijdschhorizon de minste socio-economische kosten met zich meebrengt. Doordat lichtbeelden het uitgangspunt vormen in de optimalisatie, kan dit wringen met het in Nederland gebruikelijke uitgangspunt van signaalgroepafwikkeling. De socio-economische kosten worden bepaald aan de hand van een door de wegbeheerder gedefinieerde functie waarin voor verschillende typen weggebruikers (i.e. voetgangers, fietsers, openbaar vervoer) geprioriteerd kan worden tussen o.a. de vertraging, wachtrijlengte en aantal stops. SPOT units wisselen informatie uit over de verkeerstoestand en voorkeurstrategieën met naastgelegen SPOT units. Hierdoor kan vooruit worden gekeken (elke SPOT unit ontvangt schattingen van het aankomende verkeer van kruispunten stroomopwaarts) en is sterke interactie mogelijk (elke SPOT unit houdt in de lokale optimalisatie rekening met de mogelijke negatieve effecten op kruispunten stroomafwaarts). Data uitwisseling met naastgelegen kruispunten gebeurt elke paar seconden. Het is mogelijk SPOT gefaseerd in te voeren en te starten met enkele kruispunten en zonder een cen-

trale computer (dit werkt tot ongeveer zes kruispunten). Voor grotere netwerken is het nodig het UTOPIA systeem toe te voegen.

Op netwerkniveau voorziet de UTOPIA module in een mechanisme om kritische situaties af te handelen. Dit gebeurt in de vorm van twee acties die een VRI op kan vragen van nabijgelegen VRI's. Een VRI kan dus omgaan met congestie door een VRI stroomafwaarts te verzoeken de doorstroming te vergroten, of door een VRI stroomopwaarts te verzoeken de doorstroming te verkleinen. Deze verzoeken worden gerealiseerd door de groentijd beperkingen aan te scherpen of te matigen. Op netwerkniveau kan het UTOPIA model: (1) verkeersdata op netwerkniveau analyseren en voorspellingen doen voor de hoofdstromen, (2) het interne macroscopische model toepassen op het gehele netwerk en verkeerstellingen, en (3) de totale reistijd optimaliseren met inachtneming van de gemiddelde snelheid en de capaciteiten.

Duitsland – MOTION

MOTION (Method for Optimization of Traffic signals In Online-controlled Network) is een regelstrategie voor VRI's ontwikkeld door Siemens [Bielefeldt & Busch, 1994; Busch & Kruse, 2001]. Het systeem opereert op drie functionele niveaus:

1. Strategisch (elke 5, 10 of 15 minuten). Op dit niveau worden verschillende cyclustijden, verdelingen van groentijden, volgordes waarin aan richtingen groen wordt gegeven en offsets (nodig voor coördinatie) tussen kruispunten bepaald.
2. Tactisch (elke 60 tot 90 seconden). Op dit niveau worden de op dat moment te hanteren cyclustijd en de volgorde waarin aan richtingen groen moet worden gegeven bepaald.
3. Operationeel (elke seconde). Op dit niveau wordt bepaald of de groentijd voor een richting moet worden verlengd.

MOTION start met de dominante verkeersstroom door het netwerk. Voor deze stroom wordt een grid van groene golven geconstrueerd, waarbij gemodelleerde (of, indien beschikbaar, gemeten) pelotons op links meegenomen worden. Voor elke kruising wordt de optimale volgorde waarin aan de verschillende richtingen groen kan worden gegeven geïdentificeerd, en de basisverdeling van groentijden wordt bepaald. Afhankelijk van de resterende tijd per kruising en de beperkingen van de geoptimaliseerde 'offset', is er een bepaalde hoeveelheid bandbreedte beschikbaar voor lokale optimalisatie. Normaal gesproken is het doel van optimalisatie het minimaliseren van vertragingen en stops in het netwerk. Om frequente, zeer kleine aanpassingen te voorkomen worden aanpassingen alleen geïmplementeerd als er een significante verbetering te behalen valt in het overall optimalisatie-doel. Afhankelijk van het type lokale regeling en lokale regelmethode die worden gebruikt, worden de regelprogramma's geconverteerd en geïmplementeerd. Om hevige verstoringen in de verkeersstroom vanwege verandering in plan te voorkomen, vindt de overgang van het huidige naar het nieuwe plan geleidelijk plaats. Tot de volgende optimalisatie van het netwerkmodel functioneren de lokale controllers zelfstandig en passen zij hun plan aan (binnen bandbreedte) aan de lokale situatie.

Duitsland – BALANCE

BALANCE is een verkeersadaptieve netwerkregeling ontwikkeld door GEVAS software. BALANCE wordt sinds 1997 in verschillende Duitse steden toegepast. De eerste versie van de verkeersadaptieve netwerkregeling gebruikt een zogeheten hill-climbing algoritme, een zoekmethode die kan blijven steken in lokale optima. De huidige, voor het TRAVOLUTION project ontworpen, versie van BALANCE, maakt voor de optimalisatie gebruik van genetische algoritmes. In het kader van het TRAVOLUTION project is een benchmark uitgevoerd ten opzichte van een bestaande verkeerslichtenregeling op basis van groene golven. Uit de benchmark kwam een reductie in tijdsverlies bij de verkeerslichten naar voren van 19% in de ochtendspits, 32% in de avondspits en 21% gemiddeld over de dag.

Frankrijk – PRODYN

PRODYN is een real-time algoritme voor verkeersregelingen, ontwikkeld door het CERT in Toulouse, Frankrijk [Henry *et al*, 1983; Barriere *et al*, 1986; Henry & Farges, 1989; Farges *et al*, 1990]. PRODYN is ontwikkeld voor twee ontwikkelstadia: een hiërarchische regeling op twee niveaus (PRODYN-H) en een gedecentraliseerde regeling (PRODYN-D). De eerste regeling geeft het beste resultaat, echter de toepasbaarheid is gelimiteerd tot ongeveer tien kruisingen door de complexe berekeningen. De tweede regeling heeft deze beperkingen niet. Voor de tweede regeling zijn twee benaderingen bestudeerd: geen uitwisseling van informatie tussen de kruisingen, en wel uitwisseling van informatie tussen de kruisingen. Op het niveau van de kruising is het doel van het optimalisatiemodel het minimaliseren van vertraging door gebruik van verbeterde 'forward' dynamisch programmeren met randvoorwaarden voor de minimale en maximale groentijd. Op netwerkniveau wordt optimalisatie van netwerkcoördinatie uitgevoerd door een gedecentraliseerde regeling. De procedure houdt in: (1) simulatie van de output van een specifieke kruising voor elke tijdsstap zodra de kruisingregeling zijn optimalisatie voor de bewuste tijdshorizon uitgevoerd heeft, (2) versturen van simulatieoutput naar de kruisingregeling stroomafwaarts, en (3) gebruik van de output van regelingen stroomopwaarts om voor de volgende step aankomsten te kunnen voorspellen.

Australië – SCATS

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) is ontwikkeld in de vroege jaren zeventig van de vorige eeuw door de Roads and Traffic Authority van New South Wales, Australië [Lowrie, 1982]. SCATS wordt breed gebruikt in verschillende steden in Australië, Nieuw Zeeland, de VS, China, Singapore, Filippijnen en Ierland.

Om netwerkregeling op grote schaal uit te voeren maakt SCATS gebruik van een gedistribueerd hiërarchisch systeem op drie niveaus en gebruikt hierbij een centrale computer, regionale computers en lokale intelligente regelingen. De regionale computer kan adaptieve regelingen uitvoeren zonder hulp van de centrale computer, die alleen de prestatie van het systeem en de status van de apparatuur controleert. SCATS maakt gebruik van een strategisch optimalisatiealgoritme en een tactische regeling om systeembrede optimalisatie uit te voeren. De optimalisatiefilosofie bestaat uit vier hoofdmodules: (1) optimalisatie van de cycluslengte, (2) optimalisatie van de groentijdverdeling, (3) interne offset optimalisatie en (4) optimalisatie van offsets tussen kruispunten.

Om beheersredenen wordt het totale systeem in een groot aantal vergelijkbare subsystemen verdeeld, variërend van één tot tien kruispunten. De subsystemen worden zo gekozen dat zij in zoveel mogelijk verkeerscondities onafhankelijk kunnen functioneren. Om grotere groepen regelingen te coördineren, kunnen subsystemen zich verbinden om grotere systemen te vormen met een gemeenschappelijke cyclusbijeenkomst (die van het subsysteem met de grootste cyclusbijeenkomst). Vier 'achtergrond' scenario's zijn opgeslagen in de database voor elk subsysteem. De cyclusbijeenkomst en het geschikte scenario worden onafhankelijk van elkaar geselecteerd om de verkeersvraag te verwerken. Hiervoor zijn een aantal detectoren in het subsysteem gedefinieerd als strategische detectoren; dit zijn de detectoren op de stopstreep van hoofdkruisingen. Vanuit de strategische detectoren worden verschillende systeemfactoren (zoals minimale vertraging, minimaal aantal stops, maximale doorstroming) berekend, en deze worden gebruikt om te beslissen of de huidige cyclus en schema gehanteerd moeten blijven of aangepast moeten worden.

Groot-Brittannië – SCOOT

SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimization Technique) is geïnitieerd door het British Transport and Road Research Laboratory (TRRL) in de zeventiger jaren van de vorige eeuw [Hunt *et al*, 1981]. Het eerste commerciële systeem is geïnstalleerd in 1980. SCOOT is in gebruik in verschillende steden in Groot-Brittannië, de VS, Canada, China, Zuid-Afrika, Cyprus, Pakistan, Verenigde Arabische Emiraten, Chili en Spanje. In Nederland is in de 90'er jaren een proef met SCOOT in Nijmegen gedaan. SCOOT is een gecentraliseerd systeem gebaseerd op een verkeersmodel met een optimalisatiealgoritme dat is aangepast voor online toepassing. Optimalisatie gebeurt door het stapsgewijs bijwerken van een star regelschema. Voordeel van deze aanpak is dat veranderingen gradueel worden doorgevoerd. De overgang is minder verstorend en minder gevoelig voor overreageren dan de overgang tussen verschillende bijvoorbeeld scenario's welke zijn opgesteld voor verschillende perioden van de dag, zoals voor de beide spitsen en de dalperiode.

SCOOT optimaliseert op drie niveaus: Split, Cycle en Offset [Bretherton, 1989]. SCOOT meet voertuigen met een detector op een locatie stroomopwaarts van de stopstreep. SCOOT voorspelt het profiel van aankomsten bij de kruising gebaseerd op de bijgewerkte informatie over de verkeersstroom verzameld door detectoren stroomopwaarts. Dit aankomstprofiel wordt vergeleken met het vertrekprofiel, en de verschillen representeren de voertuigen die vertraagd zijn of in de rij staan bij de kruising. Deze profielen van de verkeersstroom worden geschat voor elke cyclus, gebruikmakend van een combinatie van de aankomende voertuigen, de tijd die nodig is om de wachtrij weg te werken, het effect van de offset en de aanpassing van de groentijdverdeling. De split optimalisatie in SCOOT evalueert voor ieder kruispunt elke seconde verschillende groentijdverdelingen op basis van de voorspelde aankomst- en vertrekprofielen. De groentijdverdeling met de minste vertraging wordt geïmplementeerd. De offset optimalisatie evalueert voor ieder kruispunt offsets op basis van van een geschat cyclisch aankomstprofiel. De geëvalueerde offsets verschillen typisch een paar seconden met de huidige offset. Na aanpassing van de offset kan de Split optimalisatie de timing verder invullen op basis van het verkeer dat daadwerkelijk de stopstreep nadert. De cycle optimalisatie kijkt één maal per cyclus naar de verzadigingsniveaus van alle kruispuntbewegingen. Op kritische kruispunten met een kleine reservecapaciteit zal de Cycle optimalisatie de cyclusbijeenkomst vergroten. Dit gebeurt in kleine tijdstappen (van 4, 8 of 16 seconden),

afhankelijk van de cyclustijd op dat moment. Als een kruising onder zijn capaciteit opereert, reduceert de cycle optimalisatie de cyclustijd.

Griekenland – TUC

TUC (Traffic-responsive Urban Control) hanteert een 'store-and-forward' gebaseerde benadering van het regelen van verkeer [Papageorgiou, 2003a]. TUC maakt gebruik van een vereenvoudigd wiskundig verkeersmodel dat geen gebruik van discrete variabelen. Dit maakt toepassing van efficiënte optimalisatiealgoritmen mogelijk (zoals lineair programmeren), waardoor het eenvoudiger is om op een grotere geografische schaal te regelen. De vereenvoudiging bestaat eruit dat bij het modelleren van de uitstroom wordt aangenomen dat er een continue (ononderbroken) uitstroom uit elke link is (mits de verkeersvraag groot genoeg is). Deze vereenvoudiging heeft een aantal consequenties, zoals dat de tijdstap van de discrete representatie niet korter kan zijn dan de cyclustijd. Beslissingen kunnen dus niet vaker worden genomen dan enkele cyclus. De drie hoofdmodules van TUC zijn de split, cyclus en offset regelmodules. TUC is initieel beproefd in Glasgow, Schotland in het kader van het Europese TABASCO project. Later is het systeem nog beproefd in Chania, Kreta [Papageorgiou, 2003b; Dinopoulou *et al*, 2006].

Basismethode voor de split control in TUC is de formulering van het stedelijke verkeersregelingsprobleem als een lineair kwadratisch (LQ) optimalisatieprobleem. Doel is het minimaliseren van het risico op verzadiging en terugslag van de rij, en dit wordt bereikt door manipulatie van verdeling van groen op kruispunten onder randvoorwaarde van de cyclustijd en offsets. Doel van de cycle control is het zoveel mogelijk vergroten van capaciteiten op kruisingen om zo het maximale geobserveerde verzadigingspunt van het netwerk te verhogen. In TUC wordt dit doel bereikt door een eenvoudig feedbackalgoritme dat de maximale geobserveerde verzadigingspunten van een vooraf gespecificeerd percentage van netwerk links gebruikt als criterium voor toename of afname van de cyclus. Offset control vindt plaats op basis van een gedecentraliseerde feedbackregeling die de offsets van de belangrijkste opeenvolgende kruisingen aanpast, om waar mogelijk groene golven te creëren. Hierbij wordt rekening gehouden met de huidige wachtrijen in het netwerk. Om een nieuwe offset in TUC te implementeren wordt eerst een tijdelijke cyclustijd geïmplementeerd op alle kruisingen (behalve de eerste) in een streng. De tijdelijke cyclustijd wordt eenmalig geïmplementeerd en hierna worden alle kruisingen op de streng gecoördineerd volgens de nieuwe offset.

Verenigde Staten – RHODES

RHODES (Real-time, Hierarchical, Optimized, Distributed, and Effective System) is een hiërarchisch regelsysteem dat voorspellende optimalisatie gebruikt, waarbij regeling op niveau van kruisingen en op netwerkniveau mogelijk is [Head *et al*, 1992]. RHODES omvat een hoofdregelaar, een simulator van platoons (APRES-NET), een optimalisatiemodule voor strengen (REALBAND), een simulator van individuele voertuigen (PREDICT) en een lokale optimalisatiemodule (COP). RHODES maakt gebruik van stroomopwaartse detectoren voor elke toegangsweg voor de kruisingen in het netwerk. RHODES bepaald op basis van de detectoren op de stopstreep om de afrijcapaciteit te kalibreren om zodoende de schatting van de wachrijlengtes te verbeteren. RHODES is gebaseerd op de techniek van dynamisch programmeren, en het formuleert een strategie voor het schakelen tussen

de verschillende fases gebaseerd op data van de aankomsten van voertuigen [Mirchandani & Head, 2001].

Verenigde Staten – OPAC

Het OPAC (Optimized Policies for Adaptive Control) algoritme heeft meerdere versies die in verschillende stappen tot stand gekomen zijn, variërend van OPAC-I tot OPAC-VFC [Gartner, 1983; Gartner *et al*, 1995; Gartner *et al*, 1999, Gartner *et al*, 2001]. OPAC houdt de gespecificeerde volgorden van fasen in stand. Voor netwerken waarin geen congestie plaatsvindt, regelt OPAC op een lokaal niveau de kruisingen om de fasen online te bepalen, en op netwerkniveau de synchronisatie. Voorspellingen worden gebaseerd op detectoren die 10 tot 15 seconden stroomopwaarts gelegen zijn. Na deze 10 tot 15 seconden voorspelt een model het verkeerspatroon voor 60 seconden vooruit.

OPAC verdeelt het optimaliseringsprobleem in subproblemen met behulp van dynamisch programmeren. Ook wordt op hetzelfde moment een virtuele cyclus bepaald. Deze worden geïmplementeerd voor een tijdstap van ongeveer twee tot vijf seconden. De lengte van de virtuele cyclus wordt gevarieerd volgens de behoeftes van de kritische kruising of de meerderheid van de kruisingen. De virtuele cyclus mag meestal een seconde per cyclus veranderen. OPAC probeert de doorstroming te maximaliseren, door de fase te selecteren die het maximale aantal voertuigen toestaat de kruising over te gaan. OPAC doet dit door de afrijcapaciteit en de ruimte die beschikbaar is voor voertuigen op elke link tegen elkaar af te wegen. De eerste stap in het regelen van congestie betekent het bepalen van de volgende fase gegeven dat er geen kritische link is die op het punt staat van het genereren van terugslag of dat nu al doet. Op basis van deze berekeningen bepaalt het algoritme of het nodig is de timing op nabijgelegen kruisingen te herzien.

OPAC-I neemt een oneindige horizon aan en gebruikt dynamisch programmeren om de prestatie te optimaliseren. OPAC-I kan niet online real-time geïmplementeerd worden door de tijd die nodig is om de optimale settings te berekenen. Na OPAC-II en OPAC-III is er nu OPAC-VFC. In die tijd is OPAC versneld, kan een voortschrijdende horizon gebruikt worden, is OPAC uitgebreid naar een acht-fasen kruising en is er een algoritme in opgenomen dat nabijgelegen signaleringen coördineert.

3.2. Coördinatie van toeritdoseerinstallaties

Er zijn een aantal redenen om toeritdoseerinstallaties te coördineren. Coördinatie is zinvol wanneer een enkele toeritdoseerinstallatie niet in staat is de instroom op het hoofdwegennet voldoende te doseren. Dit wordt veelal veroorzaakt doordat de beschikbare opstelruimte op de toerit volloopt en de wachtrij dreigt terug te slaan op het onderliggend wegennet. Een andere oorzaak kan zijn dat de verkeersstroom op het hoofdwegennet van zichzelf al groter is dan de capaciteit van een stroomafwaarts knelpunt. In dat geval is een individuele toeritdoseerinstallatie niet in staat het verschil te maken. Een andere reden waarom coördinatie zinvol is, is om zodoende de pijn wat

beter te verdelen. In de literatuur worden verschillende strategieën voor de coördinatie van toeritdoseerinstallaties beschreven, waaronder model gebaseerde strategieën en regelgebaseerde strategieën. Voorbeelden van model gebaseerde strategieën zijn o.a. AMOC (Technische universiteit van Kreta, Griekenland) en OASIS (INRETS, Frankrijk). Een nadeel van een model gebaseerde strategie is dat modellen een versimpeling vormen van de werkelijkheid, maar toch nog vaak te complex zijn om door een mens te doorgronden. Regel gebaseerde strategieën maken gebruik van een voor een mens beter te doorgronden heuristieken. Het merendeel van de regelgebaseerde strategieën komt voort uit de praktijk en zijn vaak genoemd naar de plek waarop deze voor het eerst zijn toegepast. Voorbeelden hiervan zijn het Denver Helper Ramp algoritme, het San Diego Ramp Metering System, het Minnesota algoritme, etc. etc. Grosso modo komen al deze algoritmen op hetzelfde neer. De meest recente beschrijving van een algoritme voor gecoördineerde toeritdoseerinstallaties is het HERO algoritme (Technische universiteit van Kreta, Griekenland). De beschrijving van dit algoritme is een goede generalisatie van veel van de eerder genoemde en in de literatuur beschreven algoritmen.

AMOC

AMOC staat voor Advanced Motorway Optimal [Kotsialis *et al*, 2005]. Het gaat om een proactieve optimal control strategie dat is ontwikkeld in het kader van het Europese project DACCORD. Er wordt getracht om de totale verblijftijd over een bepaalde rollende tijdshorizon te minimaliseren. AMOC gebruikt hiervoor een niet-lineair macroscopisch verkeersmodel; men moet dan de maximale ruimte op de toeritten kennen. Als input heeft men data over de verkeersstoestand, de lengte van de wachtrijen en een voorspelling van de vraag en de afritstromen nodig [Papamichail *et al*, 2010].

Deze methode werd in simulatie getest op de ringweg van Amsterdam. Uit een studie hierover blijkt dat de winst in totale verblijftijd ten opzichte van de situatie zonder dosering 42,6% bedraagt als er geen maximale wachtrijen worden opgelegd. In dat geval zijn er zeer grote wachtrijen op de toeritten dicht bij het knelpunt. Indien maximale wachtrijen worden ingevoerd, is er een eerlijke en meer evenredige verdeling van de wachttijd aan een toerit, verspreid over meerdere toeritten. In deze studie zijn twee gevallen uitgewerkt, namelijk (1) 40 voertuigen aan toeritten en 100 bij overgangen tussen snelwegen; (2) 80 aan toeritten en 120 tussen snelwegen. In het eerste scenario is er een winst van 31,7% en bij het tweede bedraagt de winst 37,8%. Er moet dus een afweging gemaakt worden tussen systeemefficiëntie en een billijke verdeling van de wachttijd.

HERO (HEuristic Ramp metering cOordination)

HERO is een in het kader van het Europese project EURAMP ontwikkelde gecentraliseerde methode voor coördinatie van toeritdoseerinstallaties dat werkt met een set vaste beslisregels [Papamichail & Papageorgiou, 2008]. In vergelijking met AMOC heeft HERO het voordeel dat het reactief werkt en minder informatie nodig heeft. Daardoor is het implementeren goedkoper. Daarbij komt dat de efficiëntie van AMOC afneemt bij foute voorspellingen of incidenten. Ondanks zijn relatieve eenvoudige methode blijkt de efficiëntie van HERO gelijkwaardig aan die van AMOC. Dit is verwonderlijk, omdat HERO een zeer eenvoudige strategie is. AMOC zal door zijn proactieve karakter de verkeersstoestand kunnen voorspellen. Daarom zou het logisch zijn dat AMOC voor betere resulta-

ten zorgt. HERO is geïmplementeerd door de Australische wegbeheerder VicRoads in een pilot project voor 6 opeenvolgende toeritten naar de Monash Freeway in Melbourne [Papamichail *et al*, .

De coördinatie gebeurt door minimale wachtrijen die door HERO aan de lokale doseringen worden opgelegd. Deze minimale wachtrijen kunnen omgerekend worden naar toerituitstromen. De coördinatie gebeurt pas als op een toerit (master) de wachtrij een drempelwaarde overschrijdt terwijl de dichtheid de kritische dichtheid nadert. Op dat moment legt HERO een stroomopwaartse toerit (slave) een minimale wachtrijlengte op zodanig dat de master-toerit ontlast wordt (minder sterk kan doseren) en zo de wachtrij onder controle houdt zonder dat er congestie ontstaat op de autosnelweg. De opgelegde wachtrijlengte voor de slave- toerit wordt zo gekozen dat de relatieve wachtrijen op beide toeritten gelijkwaardig zijn. Dit is dus de regel waarop HERO gebaseerd is. Indien de instroom van voertuigen toch niet opgevangen kan worden door twee toeritten, gaat HERO ook de volgende stroomopwaartse toeritten laten meewerken via hetzelfde principe tot het probleem verholpen is of het vooraf bepaalde maximale aantal toeritten meewerkt. Het inschakelen van stroomopwaartse toeritten heeft ook een negatief gevolg. Er zullen namelijk ook voertuigen gedoosd worden die de autosnelweg voor het knelpunt verlaten. Deze voertuigen worden dus nutteloos opgehouden.

3.3. Integrale maatregelcoördinatie

In de jaren 80 werden zogenaamde kennisgebaseerde systemen ofwel expertsystemen voor het eerst toegepast voor verkeersmanagement doeleinden. In die tijd creëerde de OECD een expert groep over expertsystemen in verkeer en vervoer dat leidde tot twee symposia OECD (1990), (1992). De Europese ATT/DRIVE en de Telematics Applications programma's hebben een belangrijke bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van deze systemen. In de jaren 90 is op basis van een kennisgebaseerde aanpak een groot aantal nieuwe verkeersmanagement systemen ontwikkeld en toegepast, zoals: KITS [Cuenca *et al*, 1992; Cuenca *et al*, 1995], CLAIRE [Scemama, 1990], en TRYS [Hernández *et al*, 1999].

De Europese FLUIDS en COSMOS projecten hebben op hun beurt een belangrijke bijdrage geleverd om de bestaande systemen in Europa welke vooral voor de coördinatie van verkeersregelininstallaties werden ingezet (SCOOT, UTOPIA, PROLYN en MOTION) een impuls richting integrale maatregelcoördinatie te geven. In het oorspronkelijk ontwerp van deze systemen vormden onverzadigde condities veelal het uitgangspunt. In het COSMOS project zijn deze systemen doorontwikkeld, zodat zij beter om kunnen gaan met verzadigde condities als gevolg van reguliere congestie of incidenten. Hiertoe zijn generieke procedures ontwikkeld voor congestie en incident management. Er bestaat een sterke overeenkomst tussen de binnen COSMOS ontwikkelde procedures en die welke in het, in Nederland gehanteerde, werkboek regelscenario's gedefinieerd zijn. Een belangrijk verschil tussen beide is, dat COSMOS zich vooral richt op stedelijke netwerken, en de uitwerking op dit punt veel meer detailniveau kent.

Voor integrale maatregelcoördinatie wordt in de praktijk nog steeds veelvuldig gebruik gemaakt van een kennisgebaseerde aanpak. De eerder genoemde verkeersmanagement systemen zijn thans vaak nog steeds operationeel op de locaties waar deze voor het eerst beproefd zijn en hebben inmiddels hun weg gevonden in commerciële producten en toepassingen. TRYS is thans nog operationeel in Madrid en Barcelona en CLAIRE vormt een onderdeel van een integrale oplossing van THALES in combinatie met SEGUR en is toegepast in vele steden (in m.n. Frankrijk). Ook systemen als MOTION van Siemens, SCOOT (TRL) en UTOPIA-SPOT (SWARCO/MIZAR) worden wereldwijd veel toegepast.

Congestie en Incident Management vormt de kern van alle commerciële en onderzoekstoepassingen waar integrale maatregelcoördinatie wordt toegepast. In generieke zin zijn er weinig verschillen tussen de verschillende toepassingen. De grote verschillen ontstaan pas wanneer de generieke procedures voor congestie en incidentmanagement worden toegepast in een specifieke omgeving.

4. Wat hebben we eraan?

Met de toenemende bestuurlijke en politieke interesse in netwerkmanagement wordt de vraag luider wat de effecten zijn en hoe groot deze effecten precies zijn. Voor de systemen die voor stedelijk netwerkmanagement worden ingezet zijn veel vergelijkingsstudies beschikbaar. Dit is niet het geval voor systemen die bedoeld zijn om integraal netwerkmanagement te verrichten omdat ontwikkelingen op dit gebied nog in de kinderschoenen staan. Vergelijkende studies voor dergelijke systemen worden veelal verricht in een synthetische omgeving.

Met SCOOT, een systeem van de eerste generatie, zijn vertragingstijden gereduceerd met zo'n 20% met uitschieters naar boven en naar beneden. Ook in Nederland zijn systemen voor stedelijk netwerkmanagement getest. Begin jaren 90 is het SCOOT systeem in Nijmegen geïmplementeerd en geëvalueerd, waarbij bleek dat SCOOT goed kon omgaan met de ontwikkelingen in het verkeer. De reistijden namen met ongeveer 20% af. In de loop van 1997 zijn in Eindhoven vijf kruispunten voorzien van de benodigde hard- en software ten behoeve van UTOPIA-SPOT. 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. Voor TOP-TRAC zijn voor de toepassing in Roermond winsten gerapporteerd in de ochtendspits van 24% en in de avondspits met 9%. Ter relativering dient opgemerkt te worden dat op lokaal niveau een goede afstelling van functioneel onvoldoende onderhouden verkeerslichten tot gemiddeld 20-25% reductie in de verliestijden kan leiden, zo blijkt uit een evaluatie van het 'Groene Golf Team'.

5. Waar gaan we naar toe?

In de coördinatie van maatregelen is een aantal trends zichtbaar. Eén daarvan is dat het netwerk steeds vaker integraal benaderd wordt en dat er een verschuiving is van regelsystemen welke zich primair richten op de coördinatie van gelijksoortige maatregelen (coördinatie van alleen VRI's of alleen TDI's) naar het combineren van ongelijksoortige maatregelen (coördinatie van VRI en TDI of van TDI en DRIP). Een netwerk houdt immers niet op aan de randen van de stad en wordt ook niet alleen door verkeerslichten geregeld.

Daarnaast is er een langduriger trend naar steeds fijnmaziger en anticiperend (ook wel pro-actief genoemd) regelen zichtbaar. Begin jaren tachtig van de vorige eeuw konden de verkeersregelingen in een netwerk op basis van de toen beschikbare systemen slechts met een beperkte frequentie en voor een beperkt aantal regelparameters worden bijgesteld. Inmiddels zijn deze netwerkregelingen in een aantal generaties steeds verder geëvolueerd. Intussen wordt al gesproken over de vierde generatie systemen. Integraal verkeersmanagement zal ook een dergelijke ontwikkeling doormaken. In diverse onderzoeksprojecten is en wordt invulling gegeven aan de volgende generatie integraal netwerkmanagement.

Zo heeft Van Katwijk in zijn proefschrift [Katwijk, 2008] een gedistribueerde, multi-agent, aanpak voor verkeersregeling uitgewerkt. Hij heeft daarvoor coördinatieprocedures ontwikkeld op basis waarvan regelacties op zowel microscopisch en macroscopisch niveau kunnen worden afgestemd. In aanvulling daarop is een vooruitziende verkeersafhankelijke regelalgoritme ontwikkeld dat de richtingen op het kruispunt afzonderlijk beschouwt en qua snelheid beter presteert dan bestaande benaderingen van verkeersafhankelijk regelen.

Taale heeft in zijn onderzoek gekeken naar manieren om centraal op netwerkniveau een betere verkeersafwikkeling te krijgen [Taale, 2008]. Door te anticiperen op routekeuze gedrag van de weggebruikers heeft hij laten zien dat met die aanpak verbeteringen mogelijk zijn. Ook de samenwerking tussen wegbeheerders is bekeken en door rekening met elkaar te houden, kan ook daarin winst geboekt worden.

Een andere duidelijk waarneembare trend betreft de ontwikkeling van coöperatieve systemen. Coöperatieve systemen zullen een wezenlijk onderdeel vormen van volgende generatie systemen voor integraal verkeersmanagement. In eerste instantie wellicht nog alleen als aanvullende data-bron, in tweede instantie ook als actuator en uiteindelijk als een onvervreemdbaar onderdeel van een integraal verkeersmanagement.

Literatuur

Barriere, J.F., J.L. Farges, and J.J. Henry (1986). "Decentralization vs. hierarchy in optimal traffic control". Proceedings of the 5th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control in Transportation Systems, Vienna, Austria, July 1986.

Bielefeldt, C. and F. Busch (1994). "MOTION - a new on-line traffic signal network control system". Proceedings of the 7th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, London, April 1994, pp. 55-59.

Bretherton, R.D. (1989). "SCOOT urban traffic control system: Philosophy and evaluation". Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, and Communications in Transportation, Paris, September, 1989, pp. 237-239.

Burgmeijer, J., A. Eisses, J. Hogema, E. Jonkers, S. van Ratingen, I. Wilmink, T. Bakri, en T. Vonk (2010). "Evaluatie dynamisering maximumsnelheden", rapport in opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, juni 2010.

Busch, F. and G. Kruse (2001). "MOTION for SITRAFFIC - a modern approach to urban traffic control". IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Oakland, CA, USA, August 2001, pp. 61-64.

Cuena, J., G. Ambrosino and M. Boero (1992). "A General Knowledge-Based Architecture for Traffic Control: The KITS Approach", Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Applications in Transportation Engineering, San Buenaventura, California.

Cuena, J., J. Hernández and M. Molina (1995). "Knowledge-Based Models for Adaptive Traffic Management Systems", *Transportation Research Part C*, Volume 3, no. 5, pp. 311-337.

Dinopoulou, V. Chistina Diakaki, Markos Papageorgiou (2006), "Applications of the Urban Traffic Control Strategy TUC", *European Journal of Operational Research*, Volume 175, Issue 3, December 2006, pp. 1652-1665.

Farges, J.L., I. Khoudour, and J.B. Lesort (1990). "PRODYN: On site evaluation". Proceedings of the 3rd International Conference on Road Traffic Control, London, England, April 1990.

Gartner, N.H. (1983). "OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control". *Transportation Research Record*, No. 906, 1983, pp. 75-81.

Gartner, N.H., C. Stamatiadis, and P.J. Tarnoff (1995). "Development of advanced traffic signal control strategies for intelligent transportation systems: Multilevel design". *Transportation Research Record*, No. 1494, 1995, pp. 98-105.

Gartner, N.H., P.J. Tarnoff, and C.M. Andrews (1999). "Evaluation of the optimized policies for adaptive signal control strategy". *Transportation Research Record*, No. 1683, 1999, pp. 105–114.

Gartner, N.H., F.J. Pooran, and C.M. Andrews (2001). "Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network". Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, August 2001.

Head, K.L., P.B. Mirchandani and D. Sheppard (1992). "Hierarchical framework for real-time traffic control". *Transportation Research Record*, No. 1360, 1992, pp. 82–88.

Hegyi, A., S.P. Hoogendoorn, M. Schreuder, H. Stoelhorst and F. Viti (2008). "SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory", Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Beijing, China, Oct. 12-15, 2008, pp. 827 – 832.

Henry, J.J., J.L. Farges, and J. Tuffal (1983). "The PRODYN real time traffic algorithm". Proceedings of the 4th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control in Transportation Systems, Baden-Baden, Germany, April 1983, pp. 307–312.

Henry, J.J. and J.L. Farges (1989). "PRODYN". Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, and Communications in Transportation, Paris, France, September 1989.

Hernández, J., J. Cuenca and M. Molina (1999). "Real-Time Traffic Management Through Knowledgebased Models: The Trys Approach". Proceedings of the 11th Mini-Euro Conference on Artificial Intelligence in Transportation Systems and Science, August 1999, Helsinki, Finland.

Hunt, P.B., D.I. Robertson, R.D. Bretherton, and R.I. Winton (1981). "SCOOT - a traffic responsive method of coordinating signals". TRRL Laboratory Report 1014, TRL, 1981.

Jenezon, J., J. Klijnhout and H. Langelaar (1987). "Motorway control and signaling", *Traffic Engineering and Control*, 28(6), June 1987.

Katwijk, R.T. van (2008). "Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control". PhD Thesis, Delft University of Technology, TRAIL Thesis Series T2008/3, January 2008.

Kotsialos, A., M. Papageorgiou and F. Middelham (2005). "Local and Optimal Coordinated Ramp Metering for Freeway Networks", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9 (4), 2005.

Lowrie P.R. (1982). "The Sidney Co-ordinated Adaptive Traffic System: Principles, methodology, and algorithms". Proceedings of the IEE Conference on Road Traffic Signaling, 207, pages 67–70, 1982

Mauro, V. and C. Di Taranto (1989). "UTOPIA". In Proceeding. 6th IFAC-IFIP-IFORS Symposium on Control and Communication in Transportation, Paris, September 1989, pp. 575–597.

Middelham, F. and H. Taale (1996). "SCOOT Compared". Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, Florida, October 1996.

Mirchandani, P. and L. Head (2001). "A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms and analysis". *Transportation Research Part C*, Volume 9, 2001, pp. 415–432.

Papageorgiou, M. (2003a). "An introduction to signal traffic control strategy TUC". Proceedings of the SMART NETS Final Conference – Deliverable 25, 2003.

Papageorgiou, M. (2003b). "TUC implementation: Lessons learned and future steps". Proceedings of the SMART NETS Final Conference – Deliverable 25, 2003.

Papamichail, I. and M. Papageorgiou (2008). "Traffic-responsive linked ramp-metering control". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Volume 9, pp. 111–121.

Papamichail, I. E. Kosmatopoulos, M. Papageorgiou, I. Chrysoulakis, J. Gaffney and V. Vong (2009). "HERO Coordinated Ramp Metering Implemented at the Monash Freeway". Proceedings of the 2nd International Symposium on Freeway and Tollway Operations, Honolulu, Hawaii, June 2009.

Papamichail, I., A. Kotsialos, I. Margonis and M. Papageorgiou (2010). "Coordinated ramp metering for freeway networks – A model-predictive hierarchical control approach", *Transportation Research Part C*, Volume 18, Issue 3, June 2010, pp.311-331.

Rijkswaterstaat (2007). "Verkeersmanagement 2020 – de verkeersmanagement ambitie van Rijkswaterstaat voor hoofdwegen", Den Haag, februari 2007.

Scemama, G. (1990). "Développement d'un Système à Base de Connaissance Historique pour la Gestion du Trafic", Recherche Transport Sécurité, English issue 5, June 1990.

Taale, H., J. Dibbits en W.C.M. Fransen (1997). "Real-time regelen in de stad", *Verkeerskunde*, jaargang 48, nummer 6, juni 1997.

Taale, H. (2008). "Integrated Anticipatory Control of Road Networks – A game theoretical approach", PhD thesis, Delft University of Technology, TRAIL Thesis Series T2008/15, November 2008.