

De primeur van een verkeerskundig regelconcept

Gecoördineerd netwerkbreed verkeersmanagement

Met het gecoördineerd en netwerkbreed inzetten van verschillende (soorten) maatregelen kun je de effectiviteit van het verkeersmanagement theoretisch flink verbeteren. Hoe ziet zo'n verkeerskundig regelconcept eruit? En hoe pas je dat in de altijd weerbarstige praktijk toe?

Dat wordt momenteel nader onderzocht in de ambitieuze Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam. In deze wetenschappelijke bijdrage laten de auteurs zien welk generiek toepasbaar regelconcept als onderdeel van de Praktijkproef is ontwikkeld.

Sinds jaar en dag worden met succes afzonderlijke (losse) verkeersmanagementmaatregelen ingezet om de benutting van de weginfrastructuur te vergroten. De algemene verwachting is dat het *in samenhang inzetten* van verschillende (soorten) maatregelen de effectiviteit behoorlijk kan vergroten. Er zou vooral winst mogelijk zijn bij niet-recurrente omstandigheden, zoals bij incidenten. Vele theoretische studies [1, 2, 3] hebben 'op papier' de mogelijkheden aangetoond van gecoördineerd netwerkbreed verkeersmanagement, in dit artikel afgekort tot GNV. De ervaringen in de praktijk zijn echter zeer beperkt, ook internationaal.

Daarom zijn Rijkswaterstaat, gemeente Amsterdam, Provincie Noord-Holland en de Stadsregio Amsterdam eerder dit jaar in opdracht van het ministerie van Verkeer en Waterstaat de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam gestart. Doel van de proef is om in de praktijk de effec-

ten van GNV te beproeven. Het ontwikkelen van een in de praktijk toepasbaar verkeerskundig regelconcept is hierin een belangrijk onderdeel.

In dit artikel gaan we nader in op het ontwikkelde regelconcept voor GNV. Hierbij zijn escalatie, supervisie en sierlijke terugval de belangrijkste uitgangspunten. De gekozen aanpak is generiek en laat toe dat regelalgoritmen die zichzelf al hebben bewezen, zoals het coördinatiealgoritme HERO voor gecoördineerde toeritdoserings, kunnen worden (her)gebruikt.

Historisch perspectief

Al in 1996 werd voor het vierde kaderproject DACCORD nagedacht over de mogelijkheden van het in samenhang inzetten van benuttingsmaatregelen [4]. Sindsdien zijn er talrijke, vooral theoretische studies uitgevoerd om de meerwaarde van GNV ten opzichte van lokale regelingen aan te tonen. De meeste van deze studies houden echter te weinig rekening met de pro-

blematiek van een praktische uitrol en gaan voorbij aan zaken als rekensnelheid, schaalbaarheid, beperkingen van monitoring etc. Ook de op regelscenario's gebaseerde aanpak, die al wel in de praktijk wordt toegepast, kent z'n beperkingen: het is praktisch onmogelijk om alle denkbare relevante situaties die zich in een netwerk van redelijke grootte kunnen voordoen, met een regelscenario af te dekken.

Tot de positieve uitzonderingen kunnen we de verschillende aanpakken voor gecoördineerde verkeersregelingen rekenen [1,5] en ook het recent ontwikkelde HERO-algoritme voor gecoördineerde toeritdoserings [6,7] – zie de kadertekst op pagina 31. Deze toepassingen richten zich weliswaar op slechts één type actuator (VRI's of TDI's), maar ze laten wel duidelijk zien dat de coördinatie van maatregelen ook in de praktijk een aanzienlijke winst oplevert. Zo bleek de toepassing van HERO te leiden tot een toename van 35% tot 59% in de gemiddelde snelheden [6, 7].

Praktijkproef Amsterdam

De Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam heeft kortweg tot doel de meerwaarde van GNV in de praktijk aan te tonen. Om tot een generiek regelconcept te komen, is zoveel mogelijk informatie verzameld uit beschikbare (internationale) studies. Waar nodig wordt nieuwe theorie ontwikkeld om de maatregelen aan te sturen. Uiteindelijk zal na uitrol blijken wat de precieze praktische meerwaarde is. Een gedegen evaluatie is dan ook een zeer belangrijk onderdeel van de Praktijkproef. Daarbij zullen de partijen niet alleen kijken of de proef in het Amsterdamse leidt tot verbetering van de verkeerscondities ter plekke, maar zal ook de projectie naar de situatie rondom andere steden worden gemaakt.

Gelaagde aanpak regelconcept

De nadruk in dit artikel ligt op het regelconcept dat is ontwikkeld voor het in samenhang aansturen van de verschillende maatregelen. Figuur 1 is een schematische weergave van het gelaagde regelconcept, met daarin de centrale elementen *monitoringeenheden*, *regeleenheden* en de *supervisor*. De monitoringeenheden worden gevoed door (geaggregeerde) sensordata en bepalen voor het betreffende punt, traject of deelnetwerk de knelpunten en de restruimte. De regeleenheden sturen de regelingen en de bijbehorende actuatoren aan (configuratie, regelprogramma, tekststrategie etc.) en bepalen het resterende regel-effect en het regelbereik.

De supervisor – overigens geen persoon, maar software – overziet het netwerkmanagement en verzorgt op basis van vastgestelde functies van het netwerk, redeneerregels [9], restruimte en regelbereik, de schaal waarop het netwerk wordt gemanaged (escalatie en de-escalatie naar punt-, traject- of deelnetwerkniveau). Doel is om de balans tussen de *vraag naar effect* en het *aanbod van ruimte* zo gunstig mogelijk te laten uitpakken. In zekere zin kunnen we de supervisor zien als een veiligmeester die vraag en aanbod bij elkaar brengt. Daarnaast legt de supervisor de koppeling met het aanbieden van een veilige weg, dirigeert hij de regeleenheden en interacteert hij met de wegverkeersleider.

In het vervolg zullen we de drie elementen nader toelichten.

Logische monitoringeenheden

De logische monitoringeenheden, LME's, worden gevoed door (geaggregeerde) sensordata. Ze hebben als belangrijke functie het bepalen van de *knelpunten* in het netwerk en van de *restruimte* in het netwerk. Conform de Gebiedsgericht Benutten-aanpak onderscheiden we twee typen knelpunten in het wegnetwerk:

- 1 Beleidsmatige knelpunten, uitgedrukt in relatie tot het *tactisch referentiekader*, bijvoorbeeld beschreven als het verschil tussen de huidige trajectsnelheid en de referentiesnelheid.
- 2 Verkeerskundige knelpunten, afgeleid

van het *operationeel referentiekader*, die aangeven of er sprake is van een verkeerskundig probleem.

Het tactisch referentiekader beschrijft per type weg, per functie en per prioriteitsniveau de kwaliteit uitgedrukt in gemiddelde snelheden. De prioriteiten beschrijven per functie het belang van de weg en zijn als het ware dynamisch: als op een bepaald moment de problemen in het netwerk niet meer kunnen worden opgelost, dan kan de prioriteit van een weg terugvallen naar een lager niveau, waarmee de minimale kwaliteitseisen ook terugvallen (principe van de sierlijke terugval). Het operationele referentiekader is deels gebaseerd op het tactisch referentiekader: het tactisch referentiekader wordt daarvoor aangevuld met grenswaarden die de verkeerskundige knelpunten weergeven en het mogelijk maken om effectief te regelen.

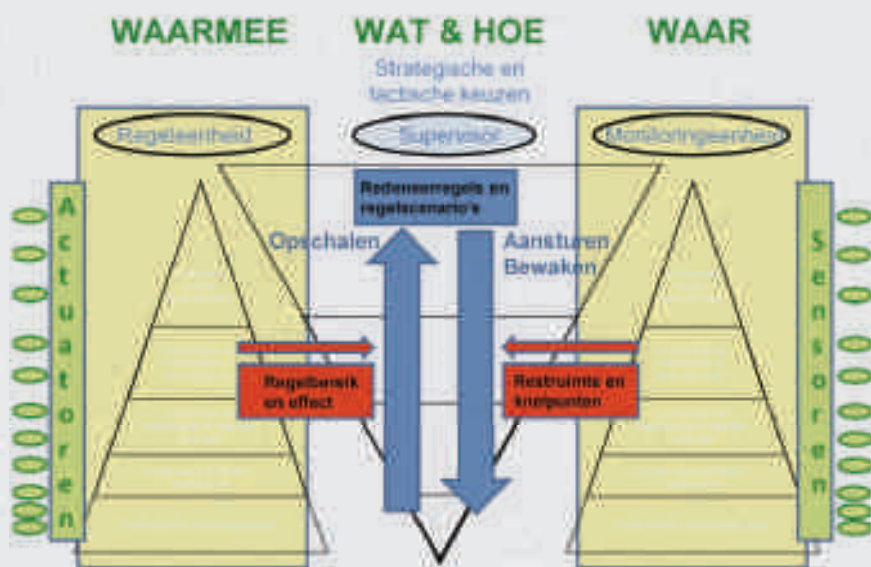
Van de beleidsmatige en verkeerskundige knelpunten wordt ook bepaald hoe groot ze precies zijn. Dit wordt op verschillende manieren gedaan (door de verschillende LME's), bijvoorbeeld op basis van het verschil in snelheid, het verschil in intensiteit en het verschil in accumulatie (aantal voertuigen op het traject).

De restruimte is in feite een 'inverse knelpunt'. Ook deze wordt op twee manieren uitgedrukt: beleidsmatig (of functioneel) en verkeerskundig, wederom als verschil ten opzichte van het referentiekader.

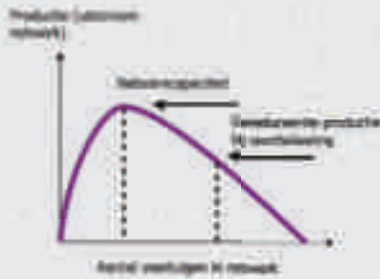
Voor het bepalen van knelpunten en restruimte op traject- en deelnetwerkniveau is een belangrijke rol weggelegd voor het Netwerk Fundamenteel Diagram (NFD). Het NFD is feitelijk een schematische weergave van het zogenaamde 'zelfblokkade-effect' in verkeersnetwerken: wanneer het aantal voertuigen in het netwerk toeneemt tot boven een kritische waarde, neemt de productie van het netwerk af als gevolg van (interne) blokkades – zie figuur 2. Dit is een zeer ongunstige situatie, mede omdat de situatie zich uiteindelijk versterkt. Op grond van het geschatte aantal voertuigen in het traject of in het deelnetwerk (of de gemiddelde dichtheid) kan eenvoudig de gemiddelde afwikkelingssituatie in het netwerk worden bepaald. Dit maakt het NFD een zeer geschikt instrument om knelpunten en restruimte te identificeren.

Logische regeleenheden

De logische regeleenheden (LRE's) sturen de regelingen en de bijbehorende actua-



Figuur 1: Gelaagd regelconcept uit de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam met de hoofdelementen logische regeleenheden, logische monitoringeenheden en de supervisor [8].



Figuur 2: Het Netwerk Fundamenteel Diagram en zelfblokkade.

toren aan. Een LRE kan bedoeld zijn voor één enkele actuator (een VRI of een TDI) of voor meerdere actuatoren tegelijk (zoals bij HERO+ gebeurt, zie kadertekst). Voor het ontlasten van bepaalde wegvakken in geval van zware congestie of incidenten zouden bijvoorbeeld meerdere DRIP's op alle belangrijke wegen in de regio in samenhang kunnen worden ingezet. Op die manier kan het verkeer met consistente routeadviezen worden geadviseerd gebruik te maken van alternatieve routes.

Op of rondom locaties als aansluitingen zijn over het algemeen meerdere LRE's actief (ook binnen een niveau), omdat er verschillende typen problemen kunnen ontstaan (verschillend in ernst en locatie) die elk een eigen aanpak vereisen.

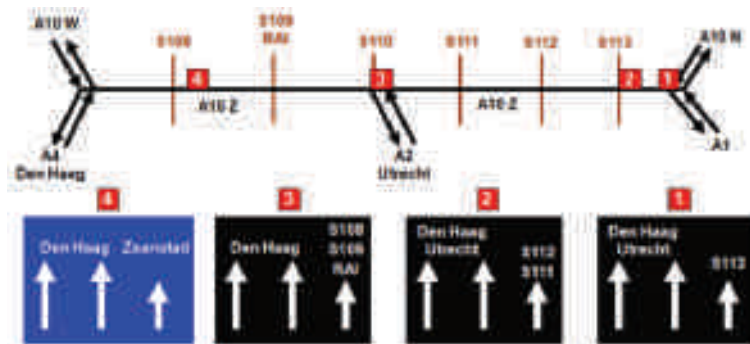
Een belangrijke functie van de LRE is het bepalen van het *regeleffect* en het *regelbereik*. Het regeleffect is het verwachte (directe) effect van de logische regeleenheid voor een specifieke instructie, bijvoorbeeld uitgedrukt in (veranderingen in) intensiteiten op de relevante punten, segmenten of trajecten in het netwerk. De regeleenheid bepaalt per instructie het directe verwachte effect.

Het verwachte regelbereik is het maximale effect van de regeleenheid voor een specifieke instructie uitgedrukt in duur, totaal aantal voertuigen, enzovoort, gegeven de (beleidsmatige) randvoorwaarden opgelegd door de supervisor. Het bereik beschrijft dus vanuit verkeerskundig perspectief hoe lang een bepaalde instructie kan worden uitgevoerd, oftewel op welk moment er niet meer aan de (beleidsmatige) randvoorwaarden wordt voldaan.

Voor het bepalen van het regeleffect en het regelbereik wordt gebruik gemaakt van eenvoudige verkeerskundige relaties, die zijn vastgelegd in de regeleenheid. De regeling die zo ontstaat, is geïllustreerd in figuur 3.

Flexibel ontvlechten van bestemmingsverkeer

Behalve de gecoördineerde inzet van reeds bestaande maatregelen worden in de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam ook nieuwe maatregelen ingezet, zoals het flexibel ontvlechten met behulp van berm-DRIP's. Deze maatregel behelst het dynamisch toewijzen van rijstroken aan doorgaand en lokaal verkeer (zie figuur 5). De gedachte is dat door het scheiden van verkeer op basis van afstandsklasse en herkomsten en bestemmingen het weefproces substantieel kan worden verbeterd, en de nadelige effecten van terugslag van congestie vanaf overbelaste afritten kan worden voorkomen. Hiertoe krijgt doorgaand verkeer één of meerdere stroken toegewezen, zodat zij 1) niet gehinderd wordt door in- en uitvoegend verkeer en 2) niet over een weefvak hoeft waarvan de capaciteit beperkt is door de vele laterale bewegingen en eventuele terugslag van file vanaf het stedelijke wegennet.



Figuur 5: Voorbeeld van het flexibel ontvlechten van bestemmingsverkeer.

De verwachting is dat deze maatregel de doorstroming bij aansluitingen en knooppunten sterk verbetert. Dit is gebaseerd op recent onderzoek naar de capaciteitswinst als gevolg van de afname in het aantal weefbewegingen bij doelgroepstroken in de VS [10] en de toename in de benutting van de rijstroken door de wachtrij voor een afrit te concentreren op de rechterrijstrook, wanneer de file vanaf de afrit terugslaat naar de hoofdrijbaan.

Als gevolg van het voorkomen van terugslag alleen kan met eenvoudige berekeningen worden aangetoond dat het aantal extra voertuigen ΔI dat per uur kan worden verwerkt gelijk is aan: $(1-\alpha)I - Ca(1/\alpha - 1)$. Hierin is α het aandeel verkeer dat van de afrit gebruik wil maken, Ca de capaciteit van de afrit en I de totale intensiteit.



Figuur 6: Situatie waarin de file vanaf de afrit terugslaat naar de hoofdrijbaan. De effectieve capaciteit van de weg reduceert hiermee aanzienlijk (afhankelijk van de capaciteit van de afrit). Stel bijvoorbeeld dat de capaciteit van de afrit 1000 vtg/u is en dat van de 4000 vtg/u op de rijbaan 30% de bestemming als afrit heeft. Wanneer de file terugslaat tot de hoofdrijbaan kunnen we met de schokgolftheorie eenvoudig berekenen dat de effectieve capaciteit (voor de volledige rijbaan) dan terugzakt naar 3333 vtg/u.



Figuur 7: Situatie waarin de wachtrij als gevolg van de beperkte capaciteit van de afrit wordt geconcentreerd op de rechter rijstrook. Onder bovengenoemde condities wordt de intensiteit ter hoogte van de afrit verhoogd tot 3800 vtg/u. Deze toename zou er in dit geval voor zorgen dat er voldoende capaciteit is voor het doorgaande verkeer.

Om effectief te kunnen regelen heeft de logische regeleenheid Flexibel Ontvlechten informatie nodig over de verkeersvraag per relevante herkomst-bestemmingsrelatie. Hiertoe is voorzien in een speciale monitoringeenheid, die bijvoorbeeld de herkomst-bestemmingrelaties on-line schat uit lusdata of door gebruik te maken van kentekencamera's.

De supervisor

De supervisor speelt een zeer belangrijke rol in het regelconcept en vervult verschillende taken. In het onderstaande lichten we die taken die voor het begrip van het regelconcept essentieel zijn, nader toe.

Overzicht bewaren over het netwerkmanagement

Als onderdeel van deze taak verbindt de supervisor de regelstrategie en het referentiekader met de monitor- en regeleenheden. Hiertoe geeft de supervisor de geografische indeling van het wegennet, de voorkeursroutes en prioriteiten uit de regelstrategie, alsmede de kwaliteitscriteria en normwaarden uit het referentiekader door aan de monitor- en regeleenheden.

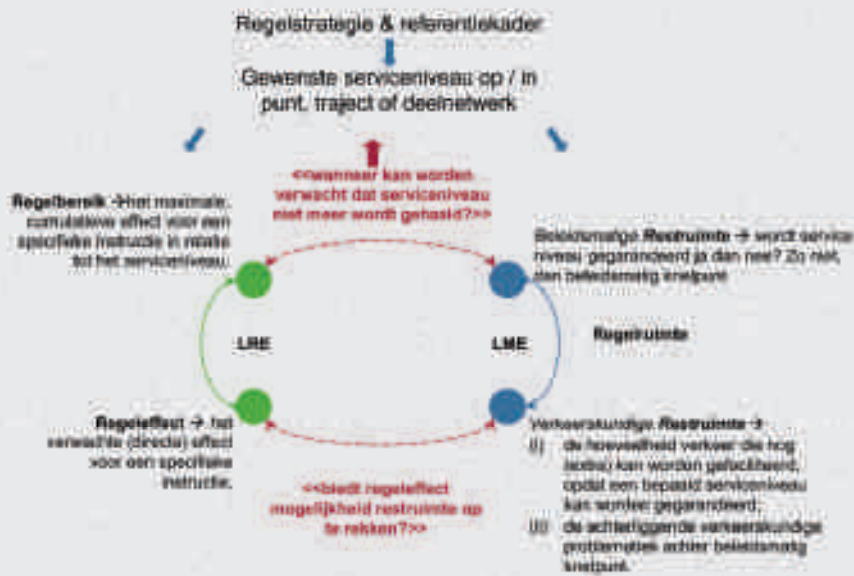
Daarnaast kiest de supervisor de relevante regelstrategie en het juiste referentiekader bij de vigerende verkeerssituatie. Hiertoe beschouwt de supervisor de balans tussen de regelruimte en het regelbereik: een verstoorde balans komt tot uiting in een negatieve regelruimte (er is een knelpunt en er is geen restructuur over) en een niet-toereikend regelbereik (er is geen effect meer over om de restructuur op te rekken en het knelpunt weg te nemen).

Supervisor schaaft het operationele management op en terug

De complexiteit van netwerkmanagement hangt één op één samen met de complexiteit in knelpunten op de weg. In het geval van lokale knelpunten in de verkeersstoestand kan worden volstaan met individuele maatregelen aangestuurd door individuele regeleenheden. Gaan de knelpunten in de verkeersstoestand elkaar beïnvloeden, dan zal op een hoger geografisch niveau moeten worden geregeld: eerst op trajectniveau, dan op deelnetwerkniveau en uiteindelijk op netwerkniveau.

Omgekeerd geldt dat als de knelpunten afnemen en weer uit elkaar vallen in individuele knelpunten, er weer kan worden geregeld op de lagere geografische niveaus. De supervisor verzorgt dit opschalen en terugschalen tussen geografische niveaus.

Dit *opschalen* door de supervisor verloopt via het volgende basisprincipe: wanneer het regelbereik ('aanbod van effecten') op het huidige niveau kleiner is dan de regelruimte ('vraag naar effecten') op dat niveau, dan schaaft de supervisor op naar een hoger niveau. De regeleenheden op het nieuwe niveau passen hun regelprogramma's aan de taak op dit nieuwe niveau aan.



Figuur 3: Verkeerskundige regeling via logische monitoringseenheden (LME) en regeleenheden (LRE).



Figuur 4: Toenemende complexiteit door interferentie van verstoringen vragen om opschalen naar hogere geografische niveaus en vice versa.

Het *terugschalen* verloopt via het omgekeerde principe: wanneer op een bepaald niveau het regelbereik en de regelruimte weer in balans zijn, dan wordt er naar dat niveau terugschakeld. De supervisor ontkoppelt de regeleenheden die op het oude, hogere niveau waren gekoppeld.

Dirigeren van de regeleenheden

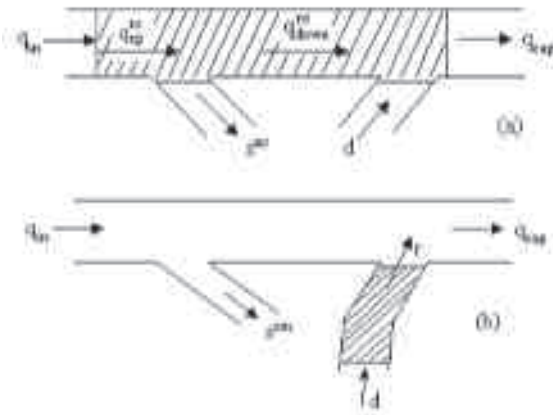
Tot slot heeft de supervisor een taak in het oplossen van conflicten die kunnen ontstaan, bijvoorbeeld omdat verschillende geografische niveaus op elkaar ingrijpen of omdat er meerdere claims worden gelegd op dezelfde maatregel.

Toepassing

Het gelaagde verkeerskundige regelconcept zoals dat in het voorgaande is beschreven, is voor de zogenaamde *proof of concept* van de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam op hoofdlijnen uitgewerkt. Aan de hand van deze eerste verkeerskundige uitwerking is de impact op technische applicaties en systemen nagegaan. Hieruit is afgeleid welke aanpassingen in welke applicaties en systemen nodig zijn om het verkeerskundige regelconcept in de praktijk te kunnen uitvoeren. Doel is de haalbaarheid en de realiseerbaarheid te toetsen. Op basis hiervan wordt binnenkort een besluit genomen of

Gecoördineerde inzet van aansluitingen met HERO+

Het beperken van de instroom naar de hoofdrijbaan door bijvoorbeeld toeritdosering kan zeer effectief zijn. Je voorkomt terugslag van de file op de hoofdrijbaan naar stroomopwaarts gelegen afritten en splitsingen (zelfblokkade) en je stelt congestie en de daarbij horende capaciteitsval uit.



Figuur 8: Voorkomen van terugslag (a) door het beperken van de instroom naar de hoofdrijbaan (b).

Vrijwel alle algoritmes beperken de instroom naar de hoofdrijbaan uitsluitend lokaal bij de actieve bottleneck. Dat is echter lang niet altijd ideaal. Omdat de maatregel niet ten koste mag gaan van de afwikke-

ling op het stedelijke wegennet, kan er vaak alleen effectief worden geregeld zolang de wachtrij op de toerit niet te lang wordt. Om langer en dus effectiever te kunnen doseren moet er extra opstelruimte worden gevonden. Dit kan op verschillende manieren. In enkele gevallen is het mogelijk de opstelruimte voor de VRI's toeleidend aan de toerit te gebruiken. Een belangrijke randvoorwaarde is dat het kruisingsvlak vrij wordt gehouden en het opgestelde verkeer het overige verkeer op de kruising niet hindert. De TDI en de toeleidende VRI's vormen in dit geval samen de gelegenheid Aansluiting.

Een andere interessante mogelijkheid is om meerdere TDI's of aansluitingen in samenhang in te zetten. Dit betekent dat er niet alleen gedoseerd wordt op de locatie waar de file ontstaat, maar ook stroomopwaarts van de file. HERO is zo'n coördinatiealgoritme dat bepaalt hoe de instroombeperking zo goed mogelijk over de verschillende aansluitingen die 'in coördinatie' staan te verdelen. HERO doet dit simpelweg door de verhouding tussen de huidige wachtrij en de maximale wachtrij voor alle aansluitingen zo gelijk mogelijk te houden.

In het kader van de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam wordt het HERO-algoritme aangepast en geschikt gemaakt om in samenhang met andere maatregelen ingezet te worden: HERO+. Deze aanpassing behelst onder meer het gebruik van aansluitingen in plaats van sec TDI's en de mogelijkheid te regelen volgens de prioriteiten zoals die zijn vastgelegd in de regelstrategie. Voorwaarde is wel dat het bestaande lokale RWS-C-algoritme wordt vervangen door het ALINEA-algoritme.

De verwachte winst in filezwaarte is afhankelijk van de hoeveelheid verkeer die via de geregelde aansluitingen de autosnelweg instroomt. Volgens de prognoses ligt de winst tussen de 10 en 50%. Een bijkomend voordeel is dat het algoritme HERO+ sluipverkeer binnen de stad ontmoedigt: omdat de wachttijden eerder worden verdeeld over de toeritten, heeft het minder zin een alternatieve toerit te kiezen.

de Praktijkproef daadwerkelijk wordt gerealiseerd. Een van de eerste stappen is dan om het verkeerskundige regelconcept nader uit te werken (op papier). Daarna kunnen de verkeerskundige regelalgoritmen worden gemaakt om die vervolgens in te voegen in de betreffende applicaties en systemen.

Conclusies

In dit artikel is een overzicht gegeven van het regelconcept zoals dat is ontwikkeld in het kader van de Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam. Zonder al te veel op details in te gaan zijn de verschillende basiselementen geïntroduceerd. Belangrijke principes hierbij zijn escalatie, supervisie en sierlijke terugval, deels gebaseerd op de gedachte: los lokaal op indien mogelijk, los netwerkbreed op indien noodzakelijk. De gekozen aanpak is 'plug&play' en laat toe dat regelstrategieën die zichzelf al hebben bewezen kunnen worden (her)gebruikt. [\[1\]](#)

Over de auteurs

Prof. dr. ir. Serge Hoogendoorn

is hoogleraar verkeersstroomtheorie en simulatie.

Dr. ir. Ronald van Katwijk

is onderzoeker bij TNO.

Paul van Koningsbruggen

is program manager bij Technolution.

Jaap van Kooten

is directeur van Arane Adviseurs in Verkeer en Vervoer.

Dr. ir. Marcel Westerman

is zelfstandig adviseur onder de naam MARCEL.

Referenties

- 1 TRG - Transportation Research Group. SCOOT in Southampton: Evaluation of SCOOT in Portswood/St. Denys Area. Technical Report prepared for Hampshire County Council, university of Southampton, 1984.
- 2 Haj-Salem, H., M. Papageorgiou. Ramp metering impact on urban corridor traffic: Field results. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 29, No. 4, Jul. 1995, pp 303-319.
- 3 Haj-Salem, H., J.-M. Blosseville, M. Papageorgiou. ALINEA - A Local Feedback Control Law for on-ramp metering: A real life study. 3rd IEE Intern. Conf. on Road Traffic Control, London, U.K., 1990, pp 194-198.
- 4 Thijs, R., Ch.D.R. Lindveld, N.J. Van Der Zijpp, and P.H.L. Bovy. Impact assessment of traffic control on motorway corridors: evaluation results from the DACCOR-project, VK 2205.334, Delft University of Technology, 2009.
- 5 Yuan, Y. Coordination of Ramp Metering Control in Motorway Networks, Master thesis, ITS Edulab, Delft, Netherlands, 2008.
- 6 Van Katwijk, R.T. Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control, PhD. Thesis, Delft University of Technology, 2008.
- 7 Papamichail, I. M. Papageorgiou. Traffic-responsive linked ramp-metering control. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9, 2008, pp 111-121.
- 8 Proof of Concept Praktijkproef Verkeersmanagement Amsterdam - Eindrapportage van werkpakket 3, DVS, oktober 2009.
- 9 J. van Kooten, M. Westerman, J. van Zijp, K. Adams. Ontwikkeling tactisch kader voor Verkeersmanagement, Stichting Post Academisch Onderwijs, 2009.
- 10 Cassidy, M., C.F. Daganzo, K. Jang, and K. Chung. Spatiotemporal Effects of Segregating Different Vehicle Classes on Separate Lanes. Proceedings of ISTTT 2009, Hong Kong.