Delft University of Technology

Delft Center for Systems and Control

Technical report 05-011

DVM Nog Onvoldoende Benut*

A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn

To cite this work, please refer to the published version:

A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn, "DVM nog onvoldoende benut," *Verkeerskunde,* Special Issue on Dynamic Traffic Management, vol. 56, no. 3, pp. 40–45, Apr. 2005. 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://dspub.eu/05-011

Verkeersmaatregelen integreren met *model predictive control*
DVM nog onvoldoende benut

Andreas Hegyi*, Bart De Schutter*, Hans Hellendoorn†

Samenvatting

Het kan beter met de DVM-maatregelen. Tenminste, dit tonen eerste simulatiestudies aan. Met een nieuwe regelmethode, het zogeheten *model predictive control* kan worden gezocht naar de optimale coördinatie van bestaande verkeersmaatregelen in een netwerk. Wat blijkt? Er kunnen misschien wel tot 30 procent meer efficiencywinsten op reistijden worden gehaald, indien bepaalde DVM-maatregelen in een netwerk meer op elkaar worden afgestemd.

In de loop der jaren zijn verschillende fundamentele fileoplossingen de revue gepasseerd: meer asfalt, meer spreiding rondom de spits, carpoolen, kilometerheffing, meer mensen in het openbaar vervoer en meer DVM-maatregelen. In deze reeks krijgt DVM serieuze aandacht, maar niet altijd op de juiste manier. Discussies over wel of niet toepassen van DVM betreft vaak het nemen van nieuwe maatregelen. Zelden wordt DVM genoemd als het gaat om het verbeteren van bestaande maatregelen, oftewel het verbeteren van de achterliggende regeltechniek. Met de regelmethode *model predictive control* (modelgebaseerd voorspellend regelen) worden DVM-maatregelen op netwerkniveau geïntegreerd, gecoördineerd en geoptimaliseerd [2]. Deze aanpak kan aanzienlijke winst boeken door betere afstemming en benutting van de beschikbare infrastructuur en maatregelen, zo blijkt uit de eerste testen.

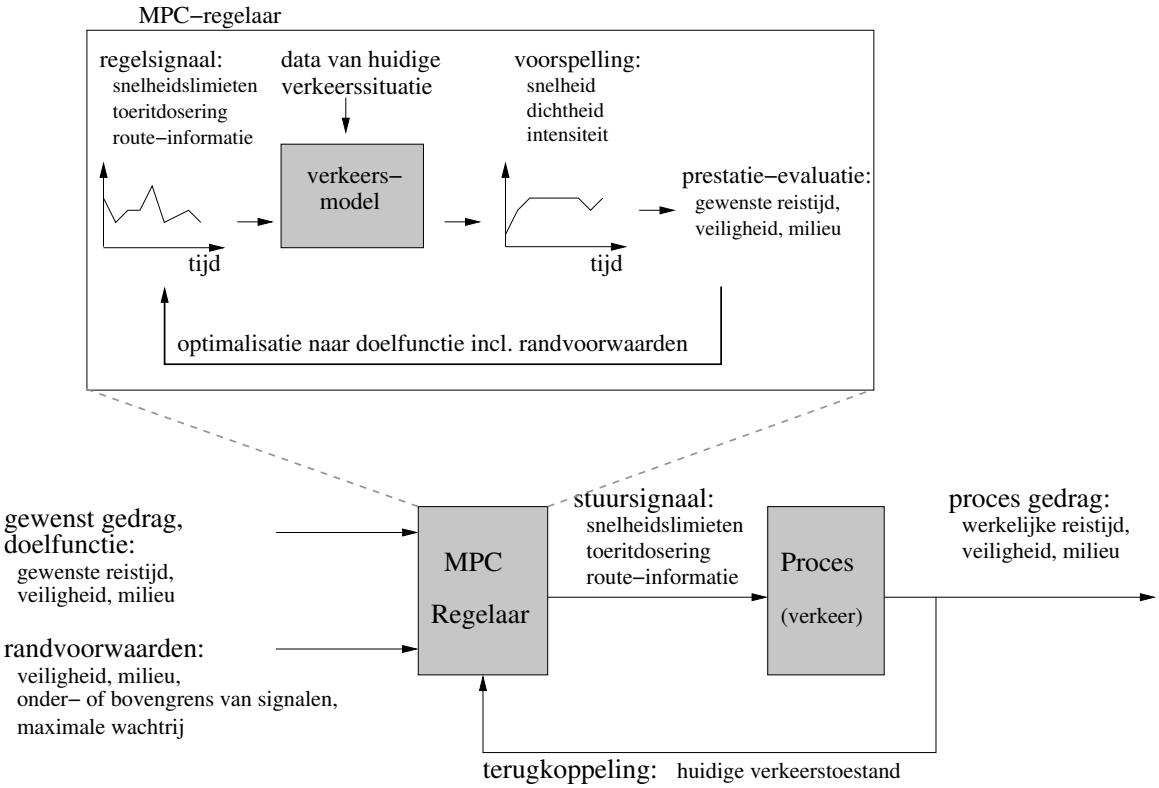
1 Coördinatie en voorspelling

De meeste verkeersbeheersingsmaatregelen werken lokaal, gebaseerd op informatie uit de directe omgeving van de maatregel. Door de toenemende hoeveelheid verkeer en het groeiend aantal files is de interactie tussen deze maatregelen zodanig toegenomen dat door lokale regelingen vaak geen duidelijke verbetering op netwerkniveau (meer) is te bereiken. Een toeritdosering lost bijvoorbeeld de file bij de toerit op, maar de verbeterde doorstroming kan een andere, stroomafwaartse file weer doen toenemen. Om ook op netwerkniveau verbetering te bereiken met een verkeersmaatregel, moet de regelaar (het regelalgoritme) rekening houden met alle gevolgen die in het netwerk optreden.

Coördinatie en integratie van verkeersmaatregelen op netwerkniveau impliceert dus rekening houden met alle gevolgen in het netwerk. Omdat sommige effecten pas na enige tijd zichtbaar worden, is ook de *voorspelling* van maatregeleffecten noodzakelijk voor het zoeken naar een optimale netwerkbrede regeling. Model predictive control (MPC) is een methode in de regeltechniek die een willekeurig aantal DVM-maatregelen in een model coördineert en gebruik maakt van een expliciete voorspellingsmodule. Bovendien kunnen er regeldoelen en randvoorwaarden worden nagestreefd, die de belangen van verschillende partijen (bv. beheerders) weergeven (Fig. 1).

Regelsignalen zijn in dit verband onder meer: de informatie op DRIP's, de waarden van dynamische snelheidslimieten en de timing van toeritdoseringen en verkeerslichten. Uitgaande van de regelsignalen en de actuele toestand van het verkeer voorspelt het model (afgebeeld in de uitvergrote

*TU Delft
†Siemens



Figuur 1: De werking van de regelmethode model predictive control.

MPC-regelaar, het gedrag van het verkeer voor een bepaalde periode. Deze voorspellingshorizon betreft meestal een periode tussen de 15 en 60 minuten, afhankelijk van de grootte van het netwerk. Met behulp van één of meer prestatie-indicatoren, zoals totale reistijd, veiligheid, of milieuverontreiniging, kan de prestatie van het voorspelde gedrag van het verkeer worden geëvalueerd. Omdat het voorspelde gedrag en de daaruit volgende prestatie-indicatoren afhankelijk zijn van de regelsignalen, wordt via numerieke optimalisatie gezocht naar de beste prestatie van de regelsignalen. Het optimale signaal wordt vervolgens toegepast op het werkelijke proces (op de borden gezet, of naar TDI's en VRI's gestuurd). Regelmatig worden de beschikbare gegevens van de verkeerstoestand (snelheden of dichtheden) teruggekoppeld naar de regelaar (zie bovenste deel van Fig. 1). De regelaar maakt weer een nieuwe voorspellings-optimalisatie slag maar de stappen *voorspelling* en *optimalisatie* worden telkens opnieuw uitgevoerd), en de nieuwe regelsignalen worden weer toegepast op het verkeer. Onvoorspelbare verstoringen of onvoorspelbaar gedrag van het verkeer worden hierdoor regelmatig (bijvoorbeeld om de 1 of 5 minuten) meegenomen in de regeling. Het regelmatig herhalen van de voorspellings-optimalisatie slag gebeurt dus met een verschuivende horizon, ook wel *rolling* of *receding horizon control* genoemd. In dit regelschema zijn de doelfunctie, de randvoorwaarden en het voorspellingsmodel bijna volledig onafhankelijk van elkaar te kiezen. Het voordeel hiervan is dat de regelaar niet als geheel opnieuw moet worden ontworpen indien er andere doelen of randvoorwaarden worden gesteld, zoals bijvoorbeeld meer nadruk leggen op het beperken van de luchtverontreiniging en veiligheid en minder op doorstroming. Ook als er betere voorspellingsmodellen beschikbaar zijn, kunnen deze het huidige model eenvoudigweg vervangen, en de andere componenten hetzelfde laten.

2 Regeldoelen en randvoorwaarden

Een belangrijk aspect van het verkeersregelprobleem is de formulering van het regeldoel. Meestal is de doorstroming of de gemiddelde reistijd een belangrijk doel, maar daarnaast spelen factoren zoals milieubelasting, brandstofverbruik, veiligheid en betrouwbaarheid van reistijdinformatie een steeds belangrijkere rol. Ook kunnen de afzonderlijke doelen van bijvoorbeeld het hoofdwegennet (HWN) en het onderliggend wegennet (OWN) in een gemeenschappelijke regeling worden geïntegreerd waardoor expliciete coördinatie ontstaat tussen HWN en OWN. Omdat deze doelen kunnen conflicteren, moet het uiteindelijke regeldoel ook de afweging tussen deze subdoelen uitdrukken.

Het voordeel van een MPC-regelaar is dat het makkelijk is het regeldoel te formuleren, inclusief prioriteiten en afwegingen. Omdat deze regelaar modulair is opgebouwd waarin het regeldoel een aparte 'module' vormt, kan het regeldoel dus door de politiek of de netwerkbeheerder worden bepaald of aangepast zonder dat de regelaar opnieuw ontworpen moet worden.

In de bestudeerde scenario's (zie kaders 'Simulatiestudies 1, 2 en 3'), is gekozen voor het primaire doel om de totale reistijd over de voorspellingshorizon te minimaliseren. Daarnaast wordt in het scenario van simulatiestudie 3 ook de betrouwbaarheid van de reistijdvoorspelling meegenomen.

Naast regeldoelen spelen in veel verkeersregelproblemen ook randvoorwaarden een rol. Deze hebben te maken met:

- de begrenzingen van de regelsignalen, zoals de minimale en maximale roodtijd van een TDI, de minimale en maximale waarden van dynamische snelheidslimieten of de voorwaarde dat vanwege veiligheidsoverwegingen een snelheidslimiet binnen een minuut niet meer dan 10 km/uur mag afnemen;
- de opgelegde randvoorwaarden voor de verkeerstoestand, zoals een maximaal toegestane lengte van een wachtrij op een toerit;
- de opgelegde randvoorwaarden voor de 'prestatie' van het verkeer: maximaal toegestane geluidsproductie of luchtverontreiniging.

Omdat het regelprobleem in feite als een optimalisatieprobleem wordt geformuleerd is het relatief eenvoudig om dit soort randvoorwaarden mee te nemen in de wiskundige beschrijving van de MPC-regelaar. In de studies zijn dit soort randvoorwaarden ook meegenomen.

3 Toepassing

Naast de aantrekkelijke functionele eigenschappen van de MPC-regelaar, moeten er nog een paar studievragen worden beantwoord voordat deze methode in de praktijk kan worden getest of toegepast. De belangrijkste vragen zijn:

- Wat is de prestatie van de MPC benadering als het interne en externe model verschillend zijn?
  In de simulaties is hetzelfde model gebruikt voor het interne model in de regelaar als voor het proces model. Hierdoor komt het gedrag van het proces exact overeen met de voorspelling van de regelaar, wat tot te optimistische resultaten kan leiden. Simulaties waarbij het procesmodel wordt vervangen door een ander model kunnen realistischere resultaten geven. De verwachting is dat het verschil niet groot zal zijn, omdat voorspellingsfouten van het interne model regelmatig worden verbeterd door de terugkoppeling in de regelaar.

- Wat is het effect van het schatten van de verkeerstoestand (op grond van beschikbare data) op de prestatie van de MPC regelaar?
  In de simulatiestudies hebben we aangenomen dat de toestand van alle snelwegsegmenten (snelheid, intensiteit, en dichtheid) beschikbaar is voor de regelaar. Deze grootheden zijn echter in het algemeen niet allemaal direct uit metingen te halen zoals die uit het MONICA of MARE systeem komen. Deze systemen meten geen dichtheid en het komt voor dat sommige meetlussen defect zijn. Een mogelijke oplossing is om op grond van data die wél beschikbaar zijn de toestand te schatten met technieken zoals Kalman filtering [4] of particle filtering. Beide methodes bepalen op grond van de beschikbare metingen de *kans* dat de verkeerstoestand een bepaalde waarde heeft.

- Wat voor prestatie is er te behalen op andere snelwegen, waar mogelijk andere modelparameters gelden?
  De simulaties zijn uitgevoerd met modelparameters die uit één kalibratiestudie komen. Andere parameters zouden wellicht tot enigszins andere resultaten kunnen leiden. De verwachting is dat dit ook niet tot grote verschillen zal leiden, omdat het succes van de regeling op grond van principiële argumenten te beredeneren valt en de parameters in feite alleen nodig zijn om de modellen af te stellen om realistisch gedrag te krijgen.

Verder onderzoek in de richting van de praktische toepasbaarheid van deze benadering zal plaatsvinden in het kader van TRANSUMO-ATMA (advanced traffic management) .

Net als alle andere fundamentele oplossingsrichtingen zal het efficiënter regelen van het verkeer niet de universele oplossing voor het fileprobleem zal zijn, maar het kan wel een significante bijdrage leveren aan de oplossing. Zoals uit de simulatiestudies blijkt, kan met coördinatie en optimalisatie van de bestaande maatregelen al veel winst worden behaald.

Literatuur

[1] "Eindevaluatie slimrijden — Verkeerskundige- en weggebruikersevaluatie." AVV, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003.

[2] A. Hegyi, *Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, Feb. 2004. TRAIL Thesis Series T2004/2. http://www.dcsc.tudelft.nl/~ahegyi/thesis/dep_hegyi_20040203.pdf

[3] S. Smulders, "Control of freeway traffic flow by variable speed signs," *Transportation Research Part B*, vol. 24, no. 2, pp. 111–132, 1990.

[4] Y. Wang and M. Papageorgiou, "Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a general approach," *Transportation Research Part B*, vol. 39, no. 2, pp. 141–167, 2005.

[5] J.K. Wilkie, "Using variable speed limits to mitigate speed differentials upstream of reduced flow locations," Tech. rep., Department of Civil Engineering, Texas A&M University, 1997.

Figuur 2: Dynamische snelheidslimieten kunnen schokgolven oplossen.

Kortweg

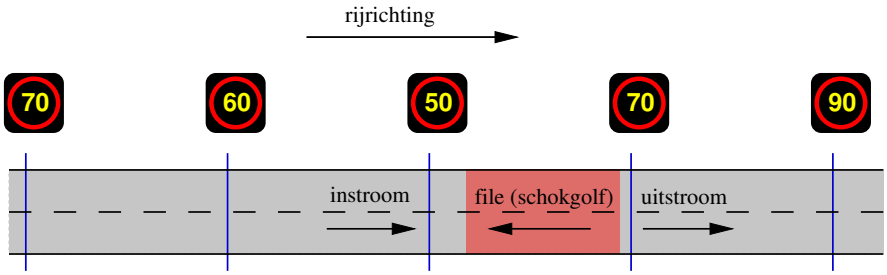
- *Model predictive control* berekent voor een bepaalde tijdsspanne de optimale maatregelen op basis van complexe regeldoelen, randvoorwaarden, en de huidige verkeerstoestand.
- Afhankelijk van het scenario zijn in simulatiestudies effectverbeteringen van 8,5 tot 30 procent bereikt.
- Verder onderzoek is nodig om deze resultaten ook in de praktijk te kunnen garanderen.

A Simulatiestudie 1: Schokgolven oplossen met dynamische snelheidslimieten

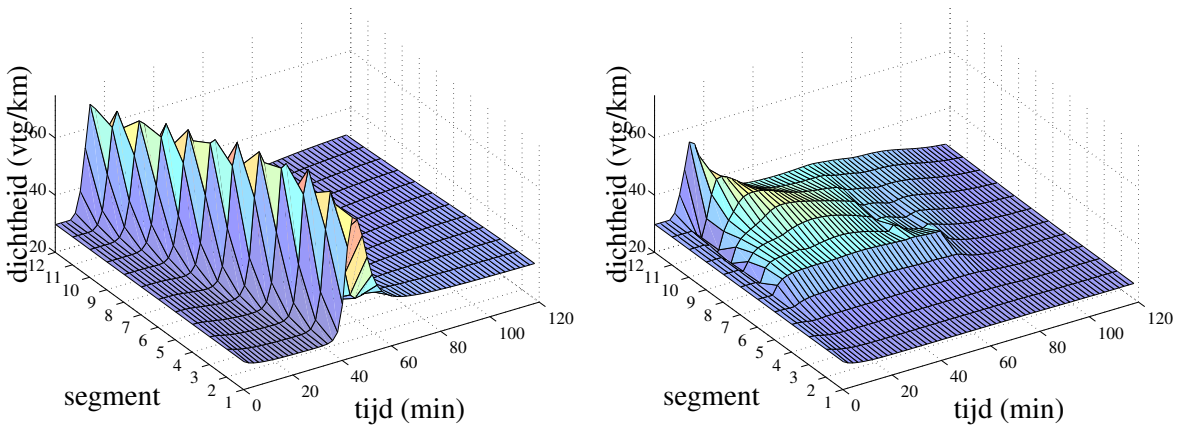
Schokgolven op snelwegen ontstaan vaak bij bottlenecks. Veelal blijven ze lang bestaan en propageren stroomopwaarts over een langer traject. Dit veroorzaakt extra vertraging en is ook onveilig. In deze simulatiestudie is het effect van dynamische snelheidslimieten bestudeerd op schokgolven op de A1 tussen Apeldoorn en Deventer. De files op dit traject ontstaan bij de aansluiting met de A50 bij hectometerpaal 88.9 (na H2) en bij de aansluiting Twello bij hectometerpaal 96.2 (na H5). Uit de files bij de toeritten ontstaan schokgolven (blauw en zwart) die stroomopwaarts (naar beneden dus) propageren met een snelheid van iets minder dan 20 km/uur.

Door de instroom in een schokgolf te beperken met snelheidslimieten tot een intensiteit die lager is dan de uitstroom, zal de file geleidelijk 'leeglopen' (Fig. 3). Omdat het verkeer hierbij wordt afgeknepen zal stroomopwaarts de dichtheid toenemen (voertuigen hopen zich op). Door verdere stroomopwaartse snelheidslimieten te gebruiken kan worden voorkomen dat er nieuwe files of schokgolven ontstaan.

Fig. 4 toont het verloop van de dichtheid op een snelwegtraject met een inkomende schokgolf. Elk segment staat voor 1 km snelweg en het verkeer rijdt van segment 1 richting segment 12. In Fig. 4 (links) zijn de simulatieresultaten te zien waarin geen snelheidslimieten worden toegepast. De schokgolf propageert dan stroomopwaarts over het hele traject. Als er wel wordt geregeld (Fig. 4



Figuur 3: Om de file 'leeg te laten lopen' moeten de snelheidslimieten de instroom beperken tot een waarde die lager is dan de uitstroom.



Figuur 4: Het verloop van de dichtheid op een snelwegtraject met een inkomende schokgolf zonder regeling (links) en met regeling (rechts).

(rechts)), wordt de instroom afgeknepen, stopt de staart van de file bij segment 6, en stroomt de file geleidelijk leeg. Als de file is opgelost, worden de snelheidslimieten opgeheven en kan het verkeer weer vrij stromen.

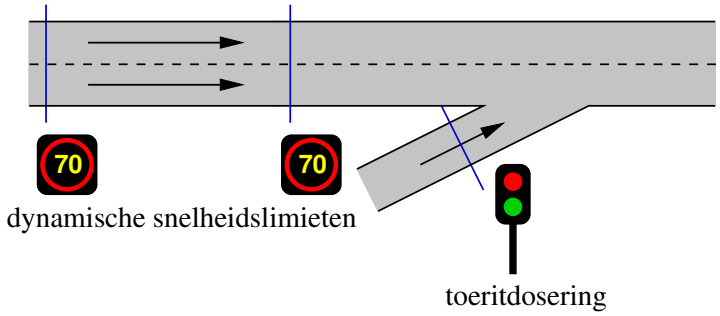
Deze benadering is wezenlijk anders dan de zogenaamde homogeniseringbenadering [5, 1]. Voor homogenisering worden typische snelheidslimieten (waarden van 70 tot 110 km/uur) toegepast die wel de snelheid beperken maar niet de intensiteit. De bedoeling hierbij is dat door de vermindering van de snelheidsverschillen binnen en tussen de stroken minder verstoringen optreden, waardoor de kans op het ontstaan van een file vermindert. Uit berekeningen van Smulders [3] blijkt dat deze benadering leidt tot uitstel van de file met enkele minuten. Deze methode is niet effectief als er al een file is ontstaan.

De intensiteitsbeperkende methode die in deze studie is toegepast, maakt gebruik van een groter bereik van snelheidslimieten, namelijk van 50 tot 110 km/uur, en kan naast de snelheidsbeperking ook een intensiteitsbeperkend effect hebben. Hiermee kunnen schokgolven niet alleen worden voorkomen (indien ze te voorspellen zijn), maar ook worden opgelost als ze toch zijn ontstaan. Dit leidt tot een stabielere verkeersstroom met een gemiddeld hogere intensiteit.

In de simulaties is er voor de veiligheid een randvoorwaarde meegenomen, die inhoudt dat de bestuurders binnen een minuut en/of binnen een kilometer maximaal een daling van de snelheidlimiet van 10 km/uur mogen tegenkomen. Uit de studie blijkt dat het regelen van de snelheidslimieten met MPC leidt tot een verbetering van de gemiddelde reistijd van ongeveer 20 procent. Een succesvol voorbeeld van het lokaal en tijdelijk afremmen van het verkeer om op langere termijn op netwerkniveau verbetering te behalen.

B Simulatiestudie 2: Dynamische snelheidslimieten vullen toeritdosering aan

In dit scenario is de situatie bestudeerd waarin toeritdosering als enige maatregel onvoldoende is om de file op te lossen. Snelheidslimieten kunnen in zulke situaties aanvullend werken en de file vaak wel oplossen (zie Fig. 5). Toeritdosering wordt gebruikt om files bij toeritten te voorkomen of op te lossen. Dit is niet altijd mogelijk omdat bij hoge intensiteiten op de hoofdrijbaan de toeritdosering het invoegend verkeer onvoldoende kan afknijpen. Toeritdoseringen sluiten in Nederland de toeritten nooit helemaal af; er is een minimumintensiteit die altijd wordt toegelaten.



Figuur 5: Lay-out voor simulatiestudie 2.

In deze studie is een maximum gesteld aan het aantal wachtende voertuigen op de toerit. Daarnaast zijn er twee dynamische snelheidslimieten geplaatst op de snelweg stroomopwaarts van de toerit. Deze werken als een soort doseerkraan waardoor het verkeer kan worden afgeremd (ook in intensiteit) en fungeren als een aanvulling op de toeritdosering. De geïntegreerde MPC regeling van de snelheidslimieten en de toeritdosering resulteert in dit scenario in een afname van de gemiddelde reistijd van 8,5 procent ten opzichte van toeritdosering alleen.

C Simulatiestudie 3: Het integreren van reistijdvoorspelling (route-informatie) met andere maatregelen

In netwerken waar routekeuze mogelijk is, is routegeleiding een maatregel die de efficiëntie van het verkeersnetwerk kan vergroten. In deze context heeft routegeleiding via DRIP's twee functies: informeren (over reistijden via alternatieve routes) en regelen (optimaal verdelen over alternatieve routes).

Tussen deze functies kan een conflict ontstaan: nauwkeurig informeren kan leiden tot een verdeling van het verkeer die niet optimaal is. Of, andersom geformuleerd, voor een optimale verdeling zouden mogelijk incorrecte reistijden moeten worden getoond op de DRIP's.

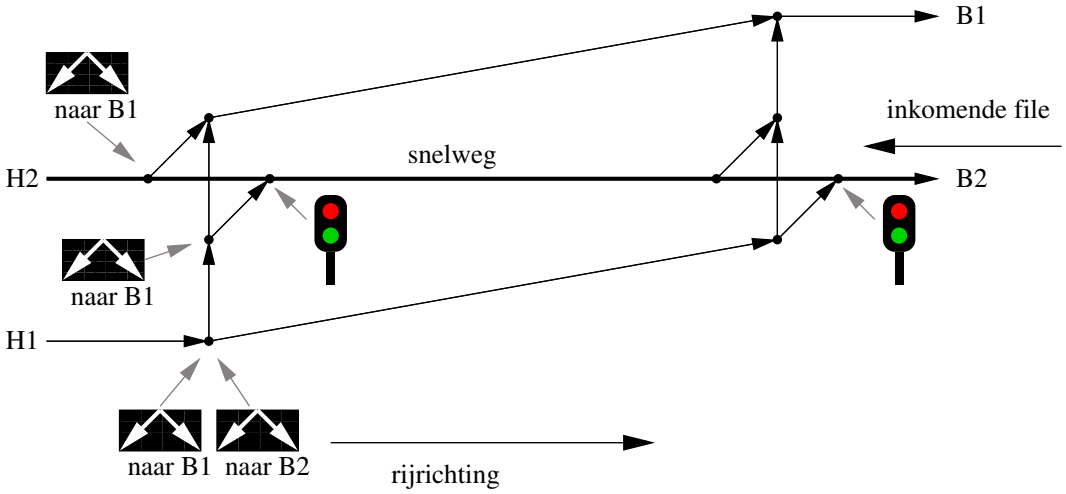
Voorafgaand aan de oplossing van dit conflict wordt gekeken naar de eigenschappen van reistijdinformatie.

Reistijdinformatie kan *instantaan* (onmiddellijk) of *predictief* (voorspellend) zijn. De instantane reistijd is de tijd die men nodig heeft om een traject af te leggen als *de verkeerssituatie op het traject ongewijzigd blijft*. De verkeerssituatie verandert echter als er files ontstaan of oplossen, dus juist wanneer de reistijdinformatie belangrijk is voor de bestuurders. Daarom is de reistijd die rekening houdt met de toekomstige ontwikkelingen, de predictieve reistijd, relevanter voor bestuurders.

Zelfs als er gebruik wordt gemaakt van predictieve reistijden, kunnen er fouten ontstaan door onvoorspelbare gebeurtenissen, zoals onvoorspelbaar rijgedrag, incidenten of het gedrag van andere dynamische maatregelen die van invloed zijn op het traject van de voorspelling. Deze laatste fout kan echter worden geminimaliseerd door integratie van de routegeleiding met de andere maatregelen: de reistijdvoorspelling houdt dan rekening met de huidige en toekomstige (geplande) acties van de andere maatregelen, en andersom kunnen de andere maatregelen hun gedrag aanpassen om de voorspelde tijden zo goed mogelijk te garanderen.

Op dit punt ligt tevens de sleutel tot de oplossing van het conflict tussen de twee functies van routegeleiding. De coördinatie van de maatregelen dient nu dus het minimaliseren van de reistijden én het zo correct mogelijk voorspellen van de reistijd. Hiertoe moeten beide subdoelen worden opgenomen in de doelfunctie van de MPC-regelaar.

In de simulatiestudie is een netwerk gebruikt met een snelweg van H2 naar B2 (zie Fig. 6). De andere wegen van H1 en naar B1 zijn secundaire wegen. Bij de toeritten van de secundaire wegen



Figuur 6: Lay-out voor simulatiestudie 3.

naar de snelweg zijn toeritdoseringen geplaatst en op alle splitsingen waar routekeuze mogelijk is, is een route-informatiepaneel geplaatst dat predictieve reistijden toont. De doelfunctie is geformuleerd als een gewogen som van de totale reistijd van alle voertuigen en het verschil van de voorspelde en werkelijke reistijden.

In het verkeersscenario komt er op een gegeven moment via B2 een file het netwerk binnen waardoor op den duur de reistijden van de routes via de secundaire wegen korter worden dan via de snelweg. In de ongeregelde situatie wordt het verkeer niet omgeleid waardoor de file in stand wordt gehouden. In de met MPC geregelde situatie wordt het verkeer wel omgeleid en wordt tegelijkertijd de toeritdosering stroomopwaarts actief waardoor de file oplost. De winst in reistijd ten opzichte van de ongeregelde situatie is bijna 30 procent.