

Optimaliseren van bereikbaarheid en externe effecten mogelijk met DVM?

Luc J.J. Wismans
Goudappel Coffeng BV / Universiteit Twente
lwismans@goudappel.nl

Eric. C. van Berkum
Goudappel Coffeng BV / Universiteit Twente
E.C.vanberkum@ctw.utwente.nl

Michiel C.J. Bliemer
Goudappel Coffeng BV / TU Delft
M.C.J.Bliemer@tudelft.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
19 en 20 november 2009, Antwerpen**

Samenvatting

Optimaliseren van bereikbaarheid en externe effecten mogelijk met DVM?

De optimalisatie van verkeerssystemen door het uitbreiden of verbeteren van het bestaande verkeersnetwerk wordt meestal het oplossen van het Netwerk Ontwerpprobleem (NDP) genoemd. Het optimaliseren van dynamisch verkeersmanagement (DVM) maatregelen kan worden gezien als een variant van het NDP. Traditioneel is deze optimalisatie gericht op het verbeteren van de bereikbaarheid. Echter, de kwaliteit van het verkeerssysteem is niet enkel een zaak van bereikbaarheid, maar ook van externe effecten zoals verkeersveiligheid, luchtkwaliteit en klimaat. In dit paper zijn de resultaten van onderzoek naar de optimalisatie van externe effecten met behulp van DVM maatregelen beschreven. De formulering en berekening van de doelfuncties zijn beschreven, waarbij gebruik is gemaakt van een macroscopisch dynamische verkeerstoedeling, en drie aanpakken op basis van een Genetisch Algoritme zijn gebruikt en vergeleken in een case studie. Daarnaast is een analyse gedaan of de doelen tegenstrijdig zijn of samengaan. In dit onderzoek is het NDP geformuleerd als een bi-level optimalisatieprobleem, waarbij in het upper level de doelfuncties met betrekking tot de externe effecten worden geoptimaliseerd en in het lower level de reactie van de gebruikers worden bepaald op de DVM maatregelen door het berekenen van het dynamisch gebruikersevenwicht. De studie laat zien dat de optimalisatie van de doelen voor congestie, verkeersveiligheid, emissies en geluid verschillende optimale oplossingen geven. Individuele optimalisatie is mogelijk, maar in het voorbeeld blijkt dat er geen toepassing van DVM maatregelen bestaat die optimaal is voor een combinatie van doelen. Er is dus een afweging noodzakelijk voor het kiezen van de uiteindelijke oplossing. Echter, de doelen emissies en congestie blijken grotendeels samen te gaan en tegenstrijdig te zijn met geluid en verkeersveiligheid. De drie aanpakken zijn verschillend in de wijze waarop de startoplossingen worden bepaald, random of op basis van een pré-optimalisatie, en of de oplossingsruimte is verkleind op basis van de resultaten van de pré-optimalisatie. De pré-optimalisatie bestaat uit een optimalisatie van de toepassing van DVM maatregelen waarbij aangenomen dat deze toepassing constant blijft gedurende de gehele evaluatieperiode. De resultaten tonen dat er geen reden is om aan te nemen dat het verkleinen van de oplossingsruimte leidt tot suboptimale oplossingen. Echter, de resultaten tonen ook dat het gebruiken van de pré-optimalisatie niet leidt tot het vinden van betere oplossingen of het sneller vinden van de optimale oplossing. Het gebruikte Genetische Algoritme blijkt effectief genoeg om de optimale oplossing te vinden zonder een pré-optimalisatie.

1. Inleiding

Traditioneel worden verkeersproblemen individueel beschouwd in termen van locatie en type probleem. Echter er is een sterke correlatie tussen problemen en een sterke correlatie tussen oplossingen. Afwikkelingsproblemen op snelwegen kunnen bijvoorbeeld leiden tot sluipverkeer door woonwijken met leefbaarheidsproblemen tot gevolg. Daarom is er steeds meer aandacht voor het zoeken van oplossingen op netwerkniveau. Daarnaast zien we veel aandacht voor beter benutten van het bestaande netwerk met verkeersmanagementmaatregelen. Deze benutting is nog met name gericht op het verbeteren van de bereikbaarheid. Echter, de kwaliteit van het verkeerssysteem is niet alleen afhankelijk van bereikbaarheid, maar ook van externe effecten zoals verkeersveiligheid en luchtkwaliteit. De laatste jaren is een groeiende aandacht voor deze effecten te zien. Binnen de Nota Mobiliteit wordt gesproken over het faciliteren van de groei van de mobiliteit en het verminderen van de externe effecten (1). De vraag is of dit mogelijk is en of de verschillende doelstellingen niet sterk tegenstrijdig zijn (2). In het onderzoek naar de "Multi-objective optimization of traffic systems" wordt een raamwerk ontwikkeld voor het optimaliseren van de externe effecten met behulp van verkeersmanagement maatregelen. Belangrijke vraag daarbij is de mate waarin de verschillende doelstellingen tegenstrijdig zijn of samen gaan. Dit onderzoek vormt onderdeel van het Advanced Traffic Management (ATMA) project van TRANSUMO.

1.1 Netwerk Ontwerpprobleem

Het optimaliseren van verkeerssystemen door het toevoegen van infrastructuur of aanpassen van bestaande infrastructuur wordt meestal het Netwerk Ontwerpprobleem (Network Design Problem (NDP)) genoemd. Het optimaliseren van een verkeerssysteem met behulp van verkeersmanagementmaatregelen kan worden gezien als een variant op dit NDP. De meeste van deze problemen worden normaal gesproken geformuleerd als een bi-level optimalisatieprobleem, waarbij op het laagste niveau de weggebruikers haar routekeuze optimaliseren en op het hoogste niveau de maatregelen dusdanig worden ingezet dat de netwerkdoelen worden behaald. Het laagste niveau wordt daarbij geoperationaliseerd door het berekenen van het stochastische of deterministische gebruikersevenwicht. Aangezien het bi-level geformuleerde NDP niet convex is (3,4,5) worden vaak heuristische als Genetische Algoritmen en Simulated Annealing gebruikt voor het oplossen van het probleem. De meeste studies binnen verkeer en vervoer richten zich op de optimalisatie van enkelvoudige doelstellingen (al dan niet bestaande uit een combinatie van doelstellingen) gegeven een aantal randvoorwaarden (bijvoorbeeld beschikbaar budget). Er is echter ook een aantal studies waarbij de meervoudige doelstellingen worden geoptimaliseerd door de Pareto set te bepalen, waarbij bijvoorbeeld het budget als minimalisatie probleem wordt toegevoegd (6). De Pareto set bestaat uit die oplossingen die niet worden gedomineerd door een andere oplossing. Oftewel er bestaat dan geen oplossing die minimaal op een van de doelstellingen beter scoort en op de overige doelstellingen minimaal gelijk scoort.

Er is reeds een aantal studies waarbij onderzoek is gedaan naar het optimaliseren van verkeersmanagementsystemen waarbij (een deel van de) externe effecten onderdeel vormde van de doelfunctie. In 1978 ontwikkelde Gershwin een systeem dat verkeerslichten, toeritdosering en doelgroepstroken kon optimaliseren met als doelen reistijd en brandstofverbruik (individueel of gecombineerd) (7). Schmöcker (8) ontwikkelden een multi-criteria fuzzy logic benadering vergelijkbaar met eerdere studies

(9) en (10) om verkeerslichten te optimaliseren waarbij zowel emissies als vertragingen worden meegenomen. In (11) is het NDP onderzocht door het te formuleren als een bi-level optimalisatieprobleem waarbij emissiekosten en reistijdskosten werden geoptimaliseerd. In (12) is een Grid Search algoritme gebruikt om de optimale toepassing van Dynamische Route Informatie Panelen (DRIP) te bepalen, waarbij de doelfunctie bestond uit een gewogen som van de emissies relevant voor luchtkwaliteit en bereikbaarheid. Dit onderzoek toont dat er verschillende optimale oplossingen zijn voor de individuele doelen en de combinatie van de doelen. In (13) is het effect van routekeuze op energiegebruik en emissies onderzocht. Dit onderzoek toont dat een gebruikersevenwicht maar ook het systeem optimum niet noodzakelijkerwijs leidt tot minimaal energiegebruik of minimale emissies.

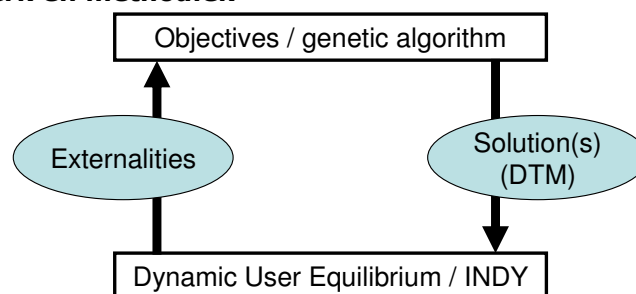
1.2 Doel van deze studie

Er zijn meerdere studies gerelateerd aan dit onderwerp, echter tot nog toe betrof dit veelal slechts een deel van de externe effecten of betrof dit een lokale optimalisatie op kruispunt- of wegvakniveau. Daarom is het onderzoek "Multi-objective optimization of traffic systems" opgestart om te bepalen hoe regionale verkeerssystemen kunnen worden geoptimaliseerd met als doelen het verminderen van de externe effecten (waarbij congestie in termen van vertragingen wordt beschouwd als onderdeel van deze externe effecten) met behulp van dynamische verkeersmanagement (DVM) maatregelen waarbij de verkeersdynamiek expliciet wordt meegenomen. In dit paper worden de resultaten beschreven van een onderzoek naar de optimalisatie van de individuele externe effecten gebruikmaken van verkeersmanagementmaatregelen en het effect hiervan op de overige externe effecten (wat betekent bijvoorbeeld optimalisatie van geluidhinder voor veiligheid), de mate waarin de doelen samengaan of tegenstrijdig zijn en worden drie aanpakken vergeleken om het optimalisatieprobleem op te lossen.

1.3 Leeswijzer

In het tweede hoofdstuk word het raamwerk en methodiek beschreven. De aanpak voor het oplossen van het optimalisatieprobleem volgt in hoofdstuk 3 en de resultaten van de case studie staan in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 volgen dan de conclusies en aanbevelingen.

2. Model raamwerk en methodiek



Figuur 1: Gebruikt raamwerk.

Het optimalisatieprobleem is binnen dit onderzoek geformuleerd als een bi-level optimalisatieprobleem. Het bovenste niveau (upper level) bestaat uit de optimalisatie van de doelen van de gezamenlijke wegbeheerders met betrekking tot congestie, luchtkwaliteit, geluidhinder, klimaat en verkeersveiligheid door het inzetten van

beschikbare DVM maatregelen. Voor het oplossen van dit probleem hebben we drie aanpakken toegepast die worden beschreven in hoofdstuk 3 en gebruik maken van een Genetisch Algoritme. Het lagere niveau (lower level) bestaat uit de weggebruikers die haar eigen doelen optimaliseren (in deze situatie minimalisatie van individuele reistijden). Dit is geoperationaliseerd door het berekenen van het dynamisch gebruikersevenwicht (DUE). In figuur 1 is een globaal overzicht gegeven van het gebruikte raamwerk.

2.1 Upper level

Het upper level bestaat uit het evalueren van de doelfuncties en de aanpak die is gebruikt om de globale optima te zoeken voor de individuele doelfuncties. Ondanks het feit dat wegbeheerders verschillende mogelijk conflicterende doelen kunnen nastreven en de beschikbare maatregelen voor de diverse partijen kunnen verschillen, gaan wij in dit onderzoek uit van een groep samenwerkende wegbeheerders. Dit kan gezien worden als een van de uitkomsten van een Gebiedsgericht Benutten (GGB) proces. De doelfuncties die zijn gebruikt zijn weergegeven in tabel 1.

Doel	Indicator	Opmerking
Congestie	Totale reistijd (h)	Omdat vaste verkeersvraag is aangenomen, is het minimaliseren van totale reistijd gelijk aan het minimaliseren van het aantal voertuigverliesuren
$\min Y = \sum_a \sum_t \sum_m \frac{q_{am}(t) \ell_a}{v_{am}(t)} \quad (1)$		
Verkeersveiligheid	Totaal aantal letselongevallen	Berekening gebaseerd op de relatie tussen blootstelling en risico per wegtype.
$\min F = \sum_a \sum_t \sum_m \sum_d q_{am}(t) \delta_{ad} R_{md} \ell_a \quad (2)$		
Klimaat	Totale hoeveelheid CO ₂ emissie (gram)	Berekening gebaseerd op gemiddelde snelheids gebaseerde discrete emissiefuncties per voertuigcategorie eerder gebruikt binnen de studie 'Effecten van snelheidshandhaving op CO ₂ emissies' (14).
$\min G = \sum_a \sum_t \sum_m q_{am}(t) E_m^{\text{CO}_2}(v_{am}(t)) \ell_a \quad (3)$		
Luchtkwaliteit	Gewogen totale hoeveelheid NO _x emissie (gram) Gewogen totale hoeveelheid PM ₁₀ emissie (gram)	Berekening gebaseerd op aan verkeerssituatie gebaseerd emissiemodel, waarbij discrete emissie functies naar afwikkelingsniveau per voertuigcategorie en per wegtype worden gebruikt. Emissiefactoren zijn afgeleid van het CAR emissiemodel en de studie 'Emissies en files' (15).
$\min F^s = \sum_a \sum_t \sum_m \sum_d w_a q_{am}(t) \delta_{ad} E_{md}^s(v_{am}(t)) \ell_a, \quad s \in \{\text{NO}_x, \text{PM}_{10}\} \quad (4)$		
Geluid	Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	Berekening gebaseerd op het standaard rekenmethode 1 uit het reken- en meetvoorschrift.
$\min W = 10 \log \left(\frac{\sum_a \sum_w \delta_{aw} \ell_a 10^{\frac{\bar{L}_w - \eta_w}{10}}}{\sum_a \sum_w \delta_{aw} \ell_a} \right), \quad \text{waarbij } \bar{L}_w = 10 \log \left(\frac{\sum_a \sum_t \delta_{aw} \ell_a \sum_m 10^{\frac{L_m(v_{am}(t))}{10}}}{\sum_a \delta_{aw} \ell_a} \right) \quad (5)$		
<p>Waarbij:</p> <p>Y : Doelfunctie congestie (= totale reistijd) (h)</p> <p>Z : Doelfunctie verkeersveiligheid (= aantal letselongevallen)</p> <p>G : Doelfunctie klimaat (= totale hoeveelheid CO₂ emissie) (gram)</p> <p>F^s : Doelfunctie luchtkwaliteit (= gewogen hoeveelheid emissie van stoffen s) (gram)</p> <p>W : Doelfunctie geluid (= gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron) (dB(A))</p>		

$q_{am}(t)$: Voertuigcategorie m instroom naar link a op tijdstip t (voertuigen)
$v_{am}(t)$: Gemiddelde snelheid van voertuigcategorie m op link a op tijdstip t (km/h)
R_{md}	: Risicocijfer van voertuigcategorie m voor wegtype d (letselongevallen/(vrt*km))
$E_m^{CO_2}(\cdot)$: CO ₂ emissiefactor van voertuigcategorie m , afhankelijk van snelheid (gram/(vrt*km))
$E_{md}^s(\cdot)$: Emissiefactor stof s van voertuigcategorie m op wegtype d , afhankelijk van snelheid (gram/(vrt*km))
$L_m(\cdot)$: Gemiddelde geluidsemissie van voertuig categorie m , afhankelijk van snelheid (dB(A))
\bar{L}_w	: Gewogen gemiddelde geluidsemissie op netwerkdeel met verstedelijkingsgraad w (dB(A))
ℓ_a	: Lengte van link a (km)
δ_{ad}	: Wegtype indicator, is 1 als link a is wegtype d , anders 0
δ_{aw}	: Verstedelijkingsgraad indicator, is 1 als link a is van verstedelijkingsgraad w , anders 0
w_a	: Verstedelijkingsgraad rond link a
η_w	: Correctiefactor voor verstedelijkingsgraad w (dB(A))

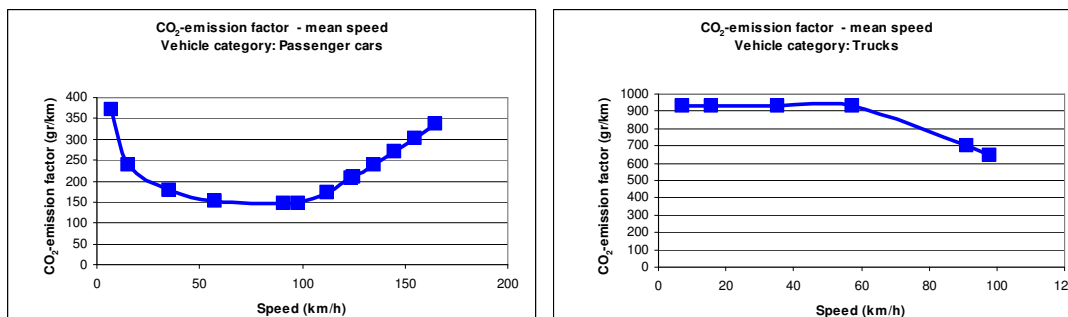
Tabel 1: Overzicht van indicatoren en doelfuncties

De gebruikte indicator voor congestie is de netwerkmaat totale reistijd. Het doel is om de som van de reistijden voor alle reistijden van alle ritten te minimaliseren. Omdat de verkeersvraag vast staat, is het minimaliseren van de totale reistijd gelijk aan het minimaliseren van het totaal aantal voertuigverliesuren

Wegtype (<i>Duurzaam Veilig</i> definities)	Risico (R_{md}) letselongevallen/miljoen voertuigkilometers
Stroomweg	0.07
Gebiedsontsluitingsweg BUBEKO	0.22
Gebiedsontsluitingsweg BIBEKO	1.10
Erftoegangsweg BUBEKO	0.43
Erftoegangsweg BIBEKO	0.57

Tabel 2: Overzicht risicocijfers

De gebruikte indicator voor verkeersveiligheid is het totaal aantal letselongevallen. De rekenmethode is gebaseerd op de relatie tussen blootstelling (aantal voertuigkilometers) en het risico per wegtype (ratio van aantal letselongevallen per voertuigkilometer). Belangrijk aandachtspunt is dat deze rekenmethode enkel het effect van de dynamiek in routekeuze van weggebruikers (gebruik van verschillende wegtype) meeneemt, maar niet het effect van verkeersdynamiek op specifieke wegen (snelheid en snelheidsverschillen). Het doel is om het totaal aantal letselongevallen te minimaliseren. In tabel 2 worden de gebruikte risicocijfers gepresenteerd (16).

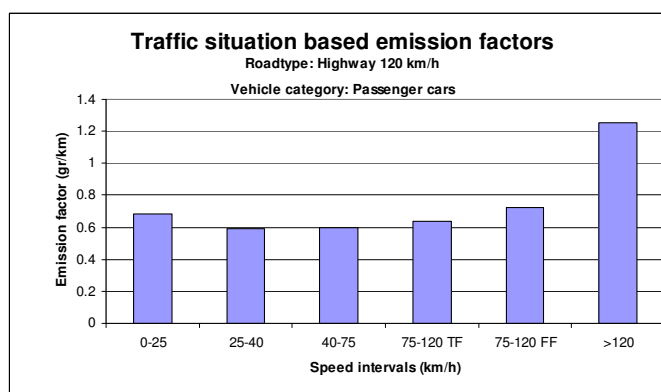


Figuur 2: Emissie functies CO₂

De indicator voor klimaat is de totale CO₂ emissie. De berekeningsmethode is gebaseerd op het gebruik van een gemiddelde snelheid gebaseerde discrete emissiefunctie die voor iedere voertuigcategorie (personenauto en vrachtauto) de relatie tussen snelheid

(discrete snelheid stappen van 5 km/h) en de emissiefactor (emissie van CO₂ per voertuigkilometer). De getoonde emissiefunctie in figuur 2 is geschat in (14) waarbij gebruik is gemaakt van de emissiefactoren geschat in (15) en een natuurkundig berekening van de benodigde energie bij hoge snelheden om de weerstanden (rolweerstand, luchtweerstand en acceleratie) te overwinnen rekening houdend met de efficiency van de motor. Belangrijk aandachtspunt is dat de emissiefuncties zijn gebaseerd op snelwegdata. Het doel is het minimaliseren van de totale CO₂.

De gebruikte indicator voor luchtkwaliteit is de gewogen totale hoeveelheid NO_x en de gewogen totale hoeveelheid PM₁₀ emissie. Naast NO_x en PM₁₀ bestaan er ook andere stoffen die relevant zijn voor luchtkwaliteit. Echter, aangezien deze twee stoffen de meeste problemen opleveren in Nederland in relatie tot de EU-normen, zijn deze in dit onderzoek gekozen. De daadwerkelijke indicator voor luchtkwaliteit is de concentratie van deze stoffen op bepaalde locaties. Om deze concentraties te kunnen bepalen is een grote hoeveelheid extra input nodig voor het berekenen van de verspreiding zoals weersomstandigheden, wegdektype en bebouwing. Deze informatie is niet standaard beschikbaar binnen een verkeersmodel en kost de nodige rekentijd. Het is daarnaast twijfelachtig hoe concentraties het beste kunnen worden geaggregeerd om de netwerkprestatie te bepalen. Het is echter een feit dat luchtkwaliteit is gerelateerd aan gezondheid en daarom is het van belang wat de concentraties zijn op specifieke locaties. Hoge concentraties in verblijfsgebieden zijn meer schadelijk dan hoge concentraties in het buitengebied. Daarom gebruiken wij wegingsfactoren per wegvak afhankelijk van de verstedelijkingsgraad. We onderscheiden drie niveaus, sterk verstedelijkt, verstedelijkt en buitengebied. De weegfactoren (w_a , respectievelijk 3, 2 and 1) zijn gebaseerd op de verdunningsfactoren die gebruikt worden in het meet- en rekenvoorschrift bevoegdheden luchtkwaliteit. Deze hangt af van de afstand en de mate waarin bebouwing aanwezig is bij de weg.



Figuur 3: Voorbeeld emissiefactoren NO_x

De rekenmethode om de emissies te bepalen is gebaseerd op verkeerssituatie afhankelijk emissiefactoren. De verkeerssituaties zijn geoperationaliseerd met discrete snelheidsintervallen die afwikkelingsniveaus representeren, per wegtype en voertuigcategorie. Voor snelwegen is ook onderscheid gemaakt in 'traffic forced' (intensiteit > 1,000 voertuigen per rijstrook/uur) en 'free flow' verkeerssituaties (intensiteit < 1,000 voertuigen per rijstrook/uur). De emissiefactoren zijn afgeleid van het CAR emissiemodel en het onderzoek 'Emissies en files' (15). Een voorbeeld van de

emissiefactoren voor personenauto's op snelwegen met een snelheidslimiet van 120 km/h wordt getoond in figuur 3. Het doel is het minimaliseren van de totale gewogen NO_x emissies en de totale gewogen PM₁₀ emissies.

De gebruikte indicator voor geluidhinder is de gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron. Net als bij luchtkwaliteit geldt ook voor geluidhinder dat de daadwerkelijke indicator de geluidsbelasting op specifieke locaties betreft. Hiervoor is een grote hoeveelheid extra input nodig is, zoals wegtype, locatie van schermen en wegalignment om de propagatie van het geluid te berekenen. Ook hiervoor geldt dat deze informatie niet standaard beschikbaar is binnen een verkeersmodel, dit de nodige rekentijd kost en het twijfelachtig is hoe deze geluidsbelastingen het beste kunnen worden geaggregeerd om de netwerkprestatie te bepalen. Voor geluidhinder geldt dat hoge geluidsemissies in verblijfsgebieden meer schadelijk of irriterend zijn dan in buitengebieden. Daarom is ook voor geluid gebruik gemaakt van correctiefactoren afhankelijk van verstedelijkingsgraad. Hierbij zijn dezelfde niveaus van verstedelijking, w , gebruikt. De correctiefactoren (η_w , respectievelijk -7, -10, -13) zijn gebaseerd op de afstand correctiefactor uit standaard rekenmethode 1 uit het reken- en meetvoorschrift.

De rekenmethode om de geluidsemissie te berekenen is een regressiefunctie die is geschat en wordt gebruikt binnen rekenmethode 1 uit het reken- en meetvoorschrift. De functie heeft de vorm:

$$L_m(v_{am}(t)) = \alpha_m + \beta_m \log\left(\frac{v_{am}(t)}{v_m^{\text{ref}}}\right) + 10 \log\left(\frac{q_{am}(t)}{v_{am}(t)\Delta t}\right), \quad (6)$$

waarbij α_m en β_m voertuigcategorie afhankelijke parameters zijn, en v_m^{ref} is een voertuigcategorie specifieke referentiesnelheid. De waarden voor deze parameters zijn 80 en 70 km/h voor de referentiesnelheden van personenauto's en vrachtauto's, en $\alpha_m = 69.4$ (76.0) en $\beta_m = 27.6$ (17.9) voor personenauto's (vrachtauto's).

Een belangrijk aandachtspunt is dat deze methode een combinatie is van rol- en motorgeluid en daarom met name gericht is op rolgeluid (welke dominant is bij hogere snelheden, typisch hoger dan 40 km/h voor personenauto's, afhankelijk van wegdekverharding) en niet op motorgeluid (welke van belang is bij lage snelheden, met name wanneer een voertuig accelereert). Er zijn geen correctiefactoren gebruikt voor acceleratie, deceleratie of wegdekverharding. Het doel is het minimaliseren van de gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron.

2.2 Lower level

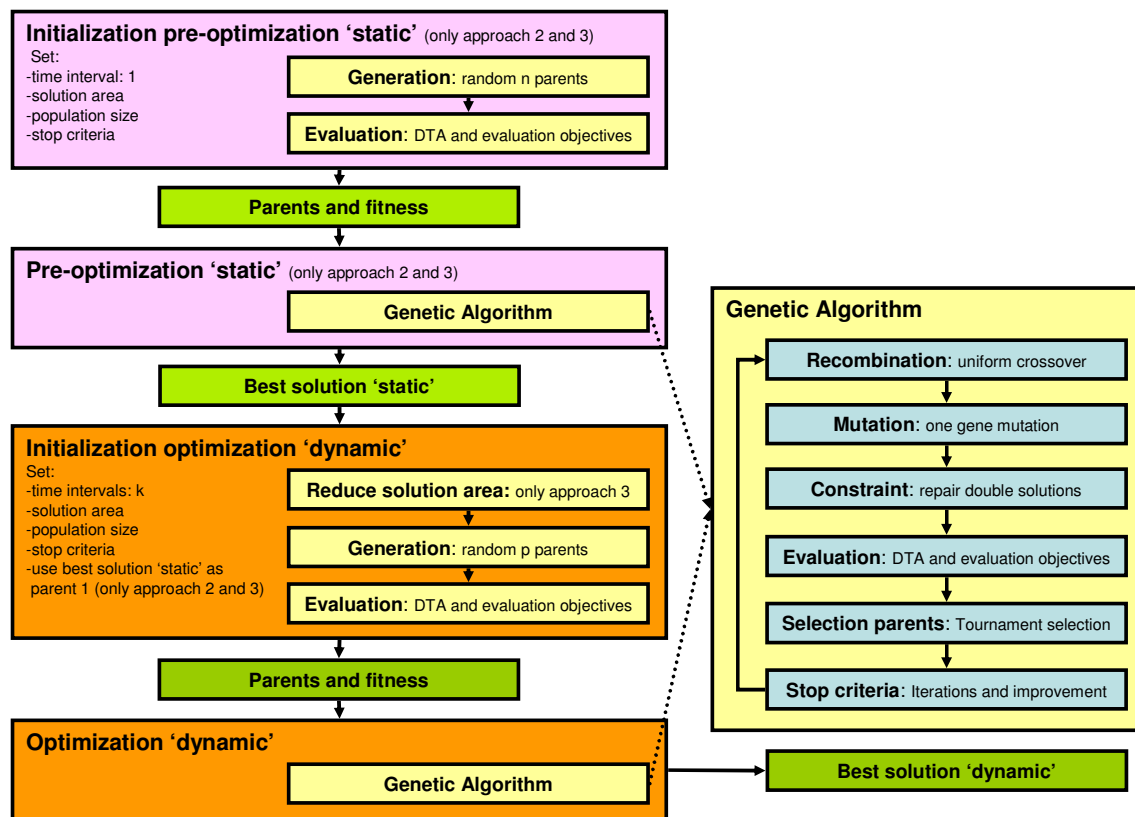
Het lower level bestaat uit de weggebruikers die haar eigen doelen optimaliseert (in dit geval individuele reistijden). Dit lagere niveau is geoperationaliseerd met het dynamisch macroscopische simulatiemodel INDY (17,18). De maatregelen zijn gemodelleerd door link attributen dynamisch te wijzigen met behulp van zogenoemde controls (bijv. capaciteit en vrije snelheid) resulteren in wijzigingen in verkeersafwikkeling en daardoor ook routekeuze van het verkeer. INDY gebruikt een relatief multinomial logit model op een vooraf gegenereerde routeset om routekeuze te modelleren en dynamic queueing om de propagatie van verkeersstromen te modelleren. De output van INDY is gebruikt om de doelfuncties uit te rekenen van de wegbeheerders op basis van de eerder beschreven methoden.

3. Aanpak oplossing optimalisatieprobleem

Het optimalisatieprobleem is niet convex (4,5,6) en het is daarnaast onmogelijk om alle mogelijke oplossingen te evalueren. De DVM maatregelen kunnen continue in de tijd en in theorie vaak ook in toepassing (bijvoorbeeld de groentijd die wordt gegeven aan een specifieke richting) worden aangepast, wat resulteert in een oneindig aantal oplossingen. We hebben het aantal ontwerpvariabelen gelimiteerd door de verschillende maatregelen te modelleren door het fundamenteel diagram dynamisch aan te passen binnen het propagatiemodel voor de wegvakken waar deze maatregelen op aangrijpen. We hebben de oplossingsruimte gediscretiseerd in de tijd, door de tijd op te delen in vaste tijdsintervallen (bijvoorbeeld, elke 15 minuten mag een DVM maatregel in toepassing wijzigen) en in toepassing door een gelimiteerd aantal toepassingen per maatregel (bijvoorbeeld capaciteiten tussen de 500 en 1.500 personenauto-equivalenten/h, met tussenstappen van 100 pae/h resulterend in 11 toepassingen). Elke combinatie van een toepassing van een DVM maatregel binnen een tijdsinterval is verbonden met een cijfer in de oplossingsvector. De oplossingsvector is daarmee het aantal DVM maatregelen maal het aantal tijdsintervallen groot. Hoewel de oplossingsruimte nu eindig is, kan deze nog steeds zeer groot zijn. Indien bijvoorbeeld 3 maatregelen met ieder 11 toepassingen en 6 tijdsperioden worden onderscheiden dan resulteert dit reeds in 5.6×10^{18} mogelijke oplossingen. Aangezien elke evaluatie van een oplossing ook de berekening van een dynamisch gebruikersevenwicht vergt, is het evalueren van alle oplossingen niet praktisch haalbaar. Daarom kiezen wij, vergelijkbaar met ander onderzoek in dit kader, een heuristisch (in dit onderzoek een Genetisch Algoritme) om binnen de oplossingsruimte te zoeken naar optima. Echter, ook deze globale aanpakken, vereisen veel functie evaluaties om een optimum te vinden. Daarom hebben we drie aanpakken getest.

Binnen de eerste aanpak zoekt het Genetisch Algoritme voor optima in de gehele oplossingsruimte. Binnen de tweede en derde aanpak wordt de zoektocht verdeeld in twee delen. In het eerste deel wordt een optimale oplossing gezocht waarbij wordt aangenomen dat de DVM maatregelen een constante toepassing behouden over de tijd (dus statische toepassing van de maatregel), oftewel de gemiddeld beste toepassing van de maatregel. Dit vergt een zoektocht in een ruimte die binnen het eerder genoemde voorbeeld slechts 1.331 mogelijke oplossingen groot is. In het tweede deel wordt vervolgens de optimale toepassing van DVM maatregelen voor de verschillende tijdsintervallen gezocht (dus een dynamische toepassing van de maatregel). De uitkomst van de eerste 'statische' optimalisatie is gebruikt om de startoplossingen voor de tweede 'dynamische' optimalisatie te bouwen. In de tweede aanpak wordt deze aanpak alleen gebruikt om de startoplossingen te bouwen, binnen de derde aanpak wordt de uitkomst van de eerste 'statische' optimalisatie tevens gebruikt om de oplossingsruimte verder te verkleinen door aan te nemen dat de optimale toepassing van een DVM maatregel binnen een tijdsinterval tussen aangrenzende toepassingen ligt. Deze aanname is gedaan omdat binnen een spitsperiode er geen grote verschillen zijn in de relatieve verkeersvraag tussen herkomst-bestemmingsrelaties, maar de verschillen tussen de tijdsperioden met name de hoeveelheid verkeer (de spitsverloop) is tussen een herkomst en bestemming. De startoplossingen die worden gebruikt in de 'dynamische' optimalisatie zijn de beste oplossing van de 'statische' optimalisatie en random geselecteerde oplossingen waarbij alleen gebruik wordt gemaakt van toepassingen van de maatregelen die gelijk zijn aan de optimale 'statische' oplossing zelf of de eerst aangrenzende toepassing. Binnen de mutatie stap kan het algoritme ook nog kiezen voor toepassingen die twee stappen weg

liggen van de gemiddeld beste toepassing. Als bijvoorbeeld de 'statische' oplossing concludeert dat de capaciteit van een bepaalde DVM maatregel 1.000 pae/h zou moeten zijn, dan zal de 'dynamische' optimalisatie bij het bouwen van de startoplossing de capaciteit van die maatregel random variëren tussen de 900 en 1.100 pae/h in elke tijdstap en kunnen capaciteiten tussen de 800 en 1.200 pae/h worden gekozen in de mutatiestap. Deze aanpak verkleint de oplossingsruimte tot minder dan 0.000001% van de originele oplossingsruimte, maar dan blijven in ons voorbeeld nog steeds 3.8×10^{12} oplossingen over. De twee-staps procedure in aanpak 3 leidt mogelijk tot het vinden van suboptimale oplossingen, aangezien we een groot deel van de mogelijke oplossingsruimte uitsluiten. Echter, we voorzien dat hierdoor binnen een redelijke rekentijd een (sub)optimale oplossing gevonden kan worden.



Figuur 4: Aanpak oplossing optimalisatieprobleem

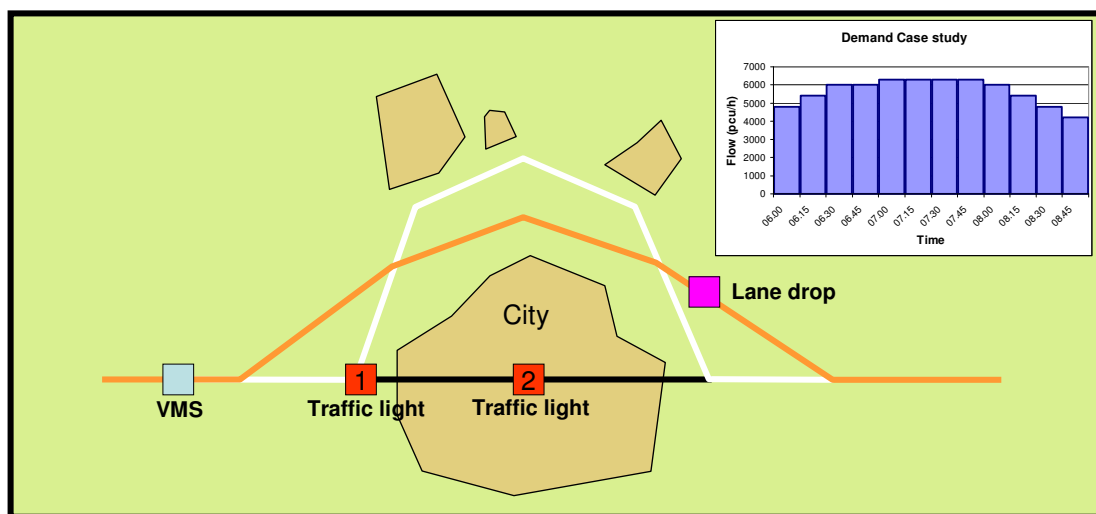
4. Case studie: optimalisatie van externe effecten

Een toepassing en een case studie is gebruikt om de resultaten te laten zien van een toepassing van het raamwerk, maar bovendien om te laten zien dat de verschillende doelen samen kunnen gaan of tegenstrijdig kunnen zijn en om de drie verschillende aanpakken te vergelijken. Na een beschrijving van de case studie wordt de referentiesituatie getoond. Daarna volgen de resultaten van de optimalisatie en de drie aanpakken.

4.1 Beschrijving case studie

Een simpel hypothetisch netwerk bestaande uit een enkele herkomst-bestemmingsrelatie met drie alternatieve routes is gebruikt. Een route gaat door de stad en maakt gebruik

van stedelijke wegen (snelheidslimiet 50 km/h); de tweede route maakt gebruik van een ringweg bestaande uit een provinciale weg (snelheidslimiet van 80 km/h); de derde route is een andere ringweg bestaande uit een snelweg (snelheidslimiet van 120 km/h). De verkeersvraag varieert in de tijd (maximaal 6.300 pae/u, zie figuur 5 voor spitsverloop) en bestaat uit personenauto's en vrachtauto's (10% van totale verkeersvraag). Binnen het netwerk zijn drie maatregelen beschikbaar om de doelfuncties te optimaliseren, twee verkeerslichten en matrixborden boven de weg om de maximale snelheid aan te passen. In totaal worden er 6 tijdsintervallen onderscheiden, evenredig verdeeld in intervallen van 30 minuten. De verkeerslichten worden gemodelleerd door de capaciteit van de richtingen te wijzigen, de maximale capaciteit is 1,500 pae/h en de minimum capaciteit 500 pae/h. Verkeerslicht 1 kan worden gezien als twee maatregelen, de eerste bestaat uit capaciteit voor de richting door de stad en de tweede voor de capaciteit voor de richting rondweg. Het modelleren van de wijzigingen in de snelheidslimiet vindt plaats door deze voor de gehele snelweg aan te passen en daarnaast een homogeniserend effect mee te nemen. Drie verschillende snelheidslimieten zijn onderscheiden, namelijk 120, 100 en 80 km/h. De snelheidslimiet van 100 km/h is gecombineerd met een toename van de capaciteit van ongeveer 2,5% en de snelheidslimiet van 80 km/h met een toename van ongeveer 5%. In het totaal bestaat de oplossingsruimte in deze case studie uit 4.0×10^{21} mogelijke oplossingen. In aanpak 2 en 3 bestaan er 3.993 mogelijke oplossingen in de 'statische' optimalisatie en binnen aanpak 3 blijven er nog 2.8×10^{15} oplossingen over na het verkleinen van de oplossingsruimte. Het gebruikersevenwicht in het lower level is berekend uitgaande van een routekeuze tijdsinterval van een kwartier en een tijdstapgrootte van 5 seconden in de propagatieberekening.



Figuur 5: Representatie netwerk

4.2 Referentiesituatie

In de referentiesituatie is de snelheidslimiet op de snelweg 120 km/h en de capaciteit van de verkeerslichten 1.000 pae/h/richting. Bij vrije reistijd is de derde route de snelste route en de tweede route het langzaamste. In de ochtendspits ontstaat file op de snelweg als gevolg van de afstropping. Hierdoor nemen de reistijden van deze route toe, waardoor meer verkeer gebruik maakt van de route door de stad en de provinciale ringweg. In de referentie gebruikt 78% van de voertuigen de snelwegroute, 9% de

provinciale route en 13% de route door de stad. Doordat meer verkeer kiest voor de niet-snelwegroute ontstaat er een wachtrij voor de eerste VRI.

4.3 Resultaten case studie

Optimalisatie

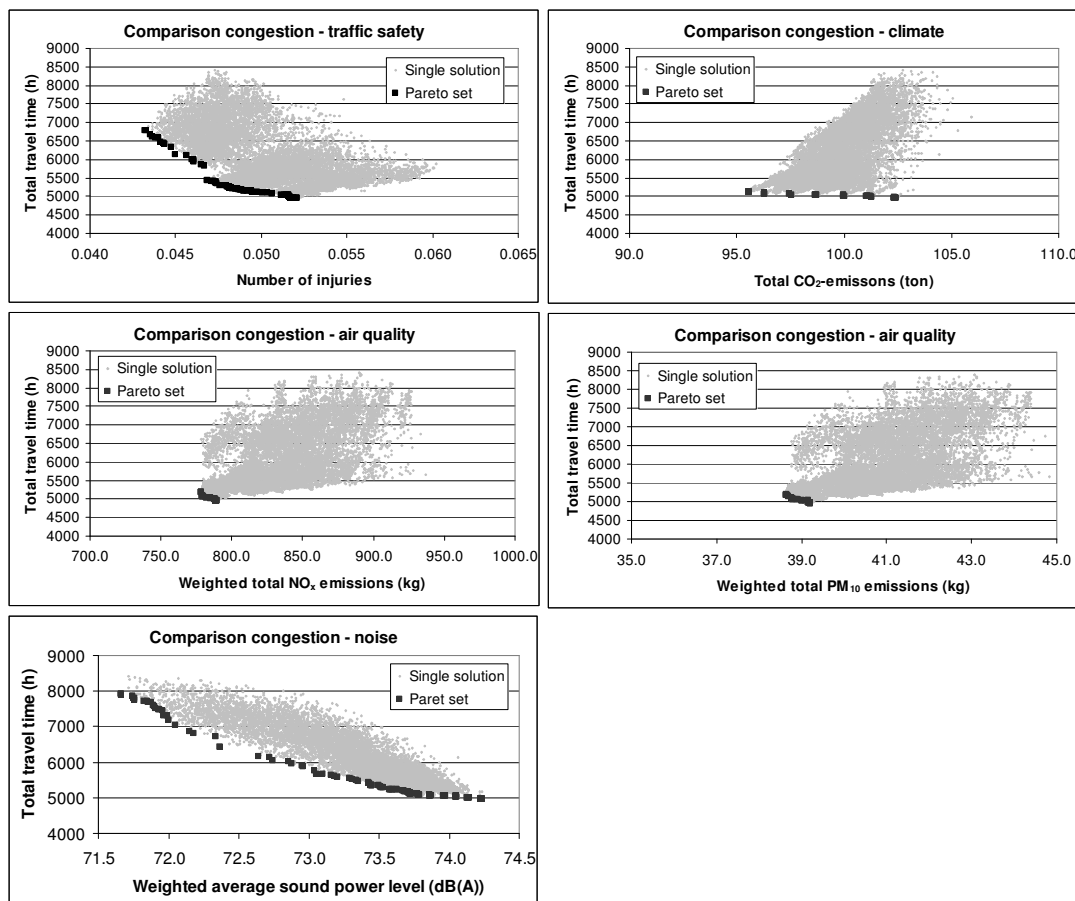
De resultaten van de optimalisatie worden in tabel 3 gepresenteerd. Iedere kolom representeert een optimaal ontwerp voor een specifiek doel. In iedere kolom is de relatieve afwijking gegeven ten opzichte van het gevonden minimum voor dat doel, welke ook in de tabel is gegeven. Wanneer bijvoorbeeld verkeersveiligheid is geoptimaliseerd, dan is de reistijd 37% hoger dan het minimum en de CO₂ emissie 5% hoger dan het minimum. De grootste relatieve verbetering ten opzichte van de referentie is mogelijk voor verkeersveiligheid. Optimalisatie van verkeersveiligheid leidt met name tot een forse toename van de reistijden, maar ook in een toename voor emissies. Optimalisatie van emissies (klimaat en luchtkwaliteit) en optimalisatie van congestie leidt tot vergelijkbare situaties. Echter, uit de tabel blijkt ook dat bij de optimale situatie voor emissies, de totale reistijd kan worden verlaagd tussen de 3-5%, maar dat betekent dat de CO₂ emissie met 7% toeneemt en de gewogen NO_x en PM₁₀ emissies met 1%. Het doel dat het meeste tegenstrijdig lijkt met de andere doelen is geluid. De afwijking van de optimale situatie voor de andere doelen is namelijk relatief groot als geluid wordt geoptimaliseerd. Omdat het grootste gedeelte van het verkeer gebruik maakt van wegvakken in het buitengebied zijn de geoptimaliseerde ontwerpen voor luchtkwaliteit en klimaat vergelijkbaar. Echter, in het algemeen zal dit niet het geval zijn, omdat in tegenstelling tot klimaat voor luchtkwaliteit de lokatie waar de stoffen worden uitgestoten van belang is en dit ook wordt meegenomen door weegfactoren in de doelfuncties.

Indicator	Geoptimaliseerd ontwerp voor elk doel							
	Minimum	Referentie	Congestie	Verkeers veiligheid	Klimaat	Lucht kwaliteit NO _x	Lucht kwaliteit PM ₁₀	Geluid
Totale reistijd (h)	4952.23	2	0	37	3	5	5	60
Totaal aantal letselongevallen	0.0432	20	20	0	20	12	13	13
Totale CO ₂ -emissie (Ton)	95.5	7	7	5	0	1	1	7
Gewogen totale NO _x emissie(Kg)	779.19	1	1	7	0	0	0	19
Gewogen totale PM ₁₀ emissie (Kg)	38.65	2	1	5	0	0	0	15
Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	71.66	4	4	2	3	3	3	0

Tabel 3: Resultaten optimalisatie

De doelen congestie, verkeersveiligheid, emissies en geluid tonen verschillende optimale oplossingen, wat betekent dat er geen toepassing van maatregelen is gevonden die resulteert in een optimale situatie voor een combinatie van de doelen. Het optimaliseren van congestie betekent het vermijden van congestie en het zo goed mogelijk gebruiken van de volledige capaciteit van de drie beschikbare routes. Maximaliseren van verkeersveiligheid betekent het maximaliseren van het gebruik van de relatief veilige snelwegroute en het vermijden van de route door de stad. Minimaliseren emissies betekent het vermijden van congestie en hoge snelheden en zoekt naar de beste weging tussen het gebruik van de stedelijke wegen en de mate van congestie op de snelweg.

Minimaliseren van geluid betekent het zo veel mogelijk verlagen van de snelheid en het vermijden gebruik van de stedelijke route.



Figuur 6: Uitkomsten doelfuncties oplossingen gerelateerd aan congestie

In figuur 6 zijn alle doorgerekende oplossingen geplote uit de 18 optimalisaties (6 optimalisaties van individuele doelfuncties in 3 aanpakken) van het doel congestie gerelateerd aan de andere doelen. De Pareto set of de efficiënt frontier wordt tevens getoond. Als deze efficiënt frontier groot is, dan zijn de doelen voornamelijk tegenstrijdig. Deze figuur bevestigt dat de doelen congestie en luchtkwaliteit samen gaan en deze tegenstrijdig zijn met verkeersveiligheid en geluid. Hoewel niet alle mogelijke oplossingen uit de totale oplossingsruimte zijn doorgerekend, is het toch mogelijk deze conclusie te trekken. Als bijvoorbeeld geluid en congestie niet tegenstrijdig zouden zijn geweest dan zouden de individuele optimalisaties niet hebben geresulteerd in een dergelijk brede efficiënt frontier. Bovendien zijn vergelijkbare resultaten gevonden in (19) waarbij een Grid Search is uitgevoerd. Voor klimaat is uit deze figuren niet te concluderen of deze samen gaan of tegenstrijdig zijn. Gezien de grote spreiding in de resultaten wanneer congestie en luchtkwaliteit tegen elkaar worden uitgezet, kan niet in het algemeen worden geconcludeerd dat wat goed is voor congestie ook goed is voor luchtkwaliteit. Echter het is in deze testcase wel mogelijk om beide tegelijkertijd grotendeels te optimaliseren.

Vergelijking van aanpakken

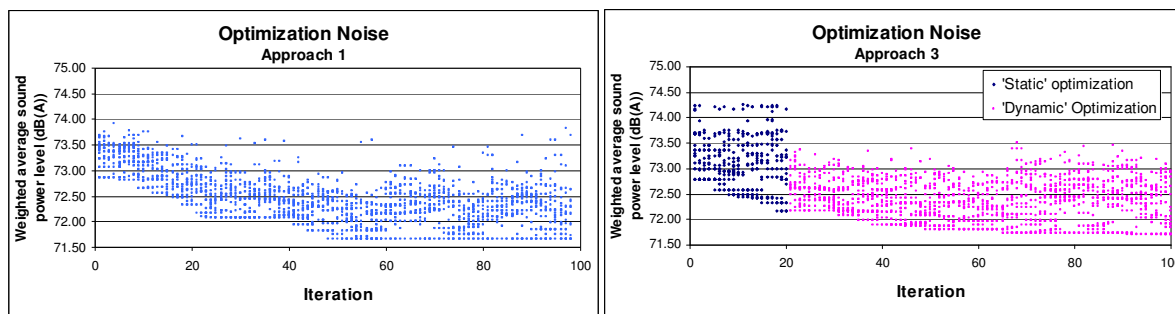
Naast de toepassing van een Genetisch Algoritme is tevens een Grid Search uitgevoerd voor de 'statische' optimalisatie om te controleren of de resultaten van deze optimalisatie in aanpak 2 en 3 leidt tot de optimale oplossing. De resultaten, gepresenteerd in tabel 4 toont dat de statische optimalisatie voor alle doelen de optimale of bijna optimale oplossing vindt. De drie verschillende aanpakken vinden binnen de 'dynamische' optimalisatie vergelijkbare resultaten. Er kan niet worden geconcludeerd dat de pré-optimalisatie ('statische' optimalisatie) de snelheid verbeterd waarmee de optima worden gevonden (het aantal iteraties getoond voor aanpak 2 en 3 zijn inclusief de twintig iteraties van de pré-optimalisatie). De aanpak die de optimale oplossing vindt is verschillend voor de verschillende doelstellingen, waardoor geen van de aanpakken duidelijk als beter kan worden aangewezen. Er is dan ook geen reden om te veronderstellen dat aanpak 3, waarbij de oplossingsruimte wordt verkleind, leidt tot het vinden van suboptimale oplossingen. Dit komt met name ook, omdat de verbeteringen ten opzichte van de referentie die worden gevonden in de 'dynamische' optimalisatie relatief klein zijn ten opzichte van de 'statische' optimalisatie. Hoewel tests met aanpak 1 waarbij het aantal iteraties fors is uitgebreid (verviervoudigd) niet heeft geleid tot grote verbeteringen voor een van de doelen (kleiner dan 1%), blijft het onzeker of er veel betere oplossingen bestaan.

		Statisch						
		Referentie	Grid Search		Aanpak 2		Aanpak 3	
<i>Doel</i>	<i>Indicator</i>		Min	-	Min	Iteraties	Min	Iteraties
Congestie	Totale reistijd (h)	5028.43	4963.95		4963.95	12	4963.95	3
Verkeers veiligheid	Totaal aantal letselonegevallen	0.052	0.044		0.045	6	0.044	10
Klimaat	Totale CO ₂ -emissie (Ton)	102.55	95.56		95.56	2	95.56	7
Lucht kwaliteit	Gewogen totale NO _x emissie(Kg)	789.43	781.81		782.04	20	781.81	20
	Gewogen totale PM ₁₀ emissie (Kg)	39.25	38.80		38.80	8	38.80	14
Geluid	Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	74.23	72.17		72.38	13	72.17	19
		Dynamisch						
		Referentie	Aanpak 1		Aanpak 2		Aanpak 3	
<i>Doel</i>	<i>Indicator</i>		Min	Iteraties	Min	Iteraties	Min	Iteraties
Congestie	Totale reistijd (h)	5028.43	4952.23	75	4961.20	89	4963.95	20
Verkeers veiligheid	Totaal aantal letselonegevallen	0.052	0.046	90	0.045	98	0.043	79
Klimaat	Totale CO ₂ -emissie (Ton)	102.55	95.57	93	95.55	25	95.55	78
Lucht kwaliteit	Gewogen totale NO _x emissie(Kg)	789.43	779.19	66	779.68	97	780.66	83
	Gewogen totale PM ₁₀ emissie (Kg)	39.25	38.71	2	38.65	92	38.67	99
Geluid	Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	74.23	71.66	49	71.92	85	71.71	92

Tabel 4: Resultaten optimalisatiebenaderingen

In figuur 7 zijn de resultaten voor het doel geluid per iteratie geplot voor aanpak 1 en 3. Deze figuur toont dat het verkleinen van de oplossingsruimte tevens de bandbreedte in de uitkomsten in de doelfunctie verkleind. Echter ook aanpak 1 waarin er geen 'statische'

optimalisatie en/of verkleining van de oplossingsruimte resulteert in een vergelijkbare figuur als aanpak 3. De verwachte winst in de eerste iteraties door de 'statische' optimalisatie is daardoor verwaarloosbaar. Dit geldt tevens voor de andere doelen. Het Genetische Algoritme dat wordt gebruikt in aanpak 1 zoekt dusdanig effectief in de oplossingsruimte dat de pré-optimalisatie in dit geval geen meerwaarde heeft.



Figuur 7: Resultaten optimalisatieproces aanpak 1 en 3

5. Discussie, conclusies en verder onderzoek

Dit onderzoek heeft een raamwerk gepresenteerd voor het optimaliseren van externe effecten met behulp van DVM maatregelen, heeft inzicht gegeven in de formulering van de doelfuncties en een toepassing getoond waarbij drie aanpakken zijn gebruikt. De optimalisatie van de doelen voor congestie, verkeersveiligheid, emissies en geluid geven verschillende optimale oplossingen. Individuele optimalisatie is mogelijk, maar in het voorbeeld blijkt dat er geen toepassing van DVM maatregelen bestaat die optimaal is voor een combinatie van doelen. Er is dus een afweging noodzakelijk voor het kiezen van de uiteindelijke oplossing. Echter, de doelen emissies en congestie blijken samen te gaan en tegenstrijdig te zijn met geluid en verkeersveiligheid.

De drie aanpakken gebruiken allen een Genetisch Algoritme, maar kennen verschillen in de wijze waarop de startoplossingen zijn bepaald, random of op basis van een pré-optimalisatie, en of de oplossingsruimte is verkleind op basis van de resultaten van de pré-optimalisatie. De pré-optimalisatie bestaat uit een optimalisatie van de toepassing van DVM maatregelen waarbij aangenomen dat deze toepassing constant blijft gedurende de gehele evaluatieperiode. De resultaten tonen dat er geen reden is om aan te nemen dat het verkleinen van de oplossingsruimte leidt tot suboptimale oplossingen. Echter, de resultaten tonen ook dat de pré-optimalisatie niet leidt tot het vinden van betere oplossingen of het sneller vinden van de optimale oplossing. Het Genetische Algoritme is effectief genoeg en de pré-optimalisatie heeft in dit geval geen meerwaarde.

De optimalisatie op basis van de drie gepresenteerde aanpakken hebben veel rekentijd nodig, die nog zal toenemen als grotere netwerken en meer maatregelen worden geëvalueerd. Het verdient daarom de aanbeveling om de aanpak verder te verbeteren door bijvoorbeeld verkeerskundige kennis te incorporeren.

Dit onderzoek is onderdeel van een onderzoeksprogramma om te bepalen hoe regionale verkeerssystemen kunnen worden geoptimaliseerd rekening houdend met meerdere doelstellingen op het gebied van de externe effecten door DVM maatregelen in te zetten. Ons onderzoek zal verdergaan naar aanpakken die bruikbaar zijn in de praktijk en worden verder uitgebreid met het daadwerkelijk uitvoeren van de multi-objective optimalisatie, waarbij de Pareto set wordt gezocht.

Referenties

1. Ministerie Verkeer en Waterstaat. Nota mobiliteit. Den Haag, 2004.
2. AVV. Werkboek gebiedsgericht benutten. Met de Architectuur voor Verkeersbeheersing. Rotterdam, 2002.
3. Gao, Z., Wu, J. and Sun, H. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research B*, Vol. 39, 2005, pp. 479-495.
4. Chiou, S. Bilevel programming for the continuous transport network design problem. *Transportation Research B*, Vol. 39, 2005, pp. 361-383.
5. Chiou, S. A subgradient optimization model for continuous road network design problem. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, 2009, pp. 1386-1396.
6. Sharma, S., Ukkusuri, S.V. and Mathew, T. A Pareto optimal multi-objective optimization for the robust transportation Network Design Problem. Presented at the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, 2009.
7. Gershwin, S.B., Ross, P., Garner, N. and Little, J.D.C. Optimization of large traffic systems. *Transportation Research Record No. 682*, 1978, pp. 8-15.
8. Schmöcker, J.-D., Ahuja S. and Bell, M.G.H. Multi-objective signal control of urban junctions - Framework and a London case study. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 16(4) pp. 454-470, 2008.
9. Anderson, J.M., Sayers, T.M. and Bell, M.G.H. Optimization of a fuzzy logic traffic signal controller by a multiobjective genetic algorithm. *Proceedings 9th International Conference Road Transport Information and Control*, 1998. pp. 186-190.
10. Murat, Y. S. and Kikuchi, S. Fuzzy optimization approach: Comparison with the classical optimization method using the problem of timing a traffic signal. *Transportation Research Record*, No. 2024, 2007, pp. 82-91.
11. Mathew, T. V. and Sharma, S. Continuous network design with emission pricing as a bi-level optimization problem. *Applications of Advanced Technology in Transportation - Proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation*, Chicago, IL, 2006.
12. Zuurbier, F.S., Hoogendoorn, S.P. and Van Lint, H. van. Evaluating non trivial objective functions for traffic management by means of optimal prescriptive route guidance. 14th world congress on ITS, Beijing Exhibition Center, China, 2007.
13. Ahn, K. and Rakha, H. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation research Part D*, Vol. 13, 2008, pp. 151-167.
14. Goudappel Coffeng. Effecten versterkte snelheidshandhaving op CO₂-emissies. Eindrapportage. Deventer. L.J.J., Wismans, P. van Beek and R.M.M. van den Brink, 2007.
15. TNO. Emissies en files – Bepalen van emissiefactoren. Eindrapportage fase 2. TNO, Delft. Report No. 01.OR.VM.0441/NG, 2001.
16. Jansen, S.T.M.C. De Verkeersveiligheidsverkenner gebruikt in de regio. De rekenmethode en de aannamen daarin. Leidschendam. SWOV-rapport R-2005-6, 2005
17. Bliemer, M.C.J., Versteegt, H.H., Castenmiller, R.J. INDY: a new analytical multi-class dynamic traffic assignment model. *TRISTAN V Conference Proceedings*, Guadeloupe, France, 2004.
18. Bliemer, M.C.J. Dynamic queuing and spillback in an analytical multiclass dynamic network loading model. *Transportation Research Record 2029*, 2007, pp. 14-21.
19. Wismans, L.J.J., Van Berkum, E.C., Bliemer, M.C.J. Multi objective optimization of traffic systems using dynamic traffic management measures. In *proceedings Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems conference*, Rome, 22 – 23 June 2009.