

(Bijdragenr. 105)

**EcoFLEX: Het verbeteren van de luchtkwaliteit met behulp van
Groen Dynamisch VerkeersManagement,
gebaseerd op real time luchtkwaliteitsmetingen**

**Anne de Koning^{1,3}, Janneke van Baalen^{2,3}, Marita Voogt², Uilke Stelwagen²,
Siebe Turksma¹**

¹ *Peek, Basicweg 16, 3821 BR, Amersfoort*

Email: anne.dekoning@peektraffic.nl

Telefoon: +31 33 454 1777

² *TNO, van Mourik Broekmanweg 6, 2628 XE Delft*

Email: janneke.vanbaalen@tno.nl

Telefoon: +31 88 866 6308

³ Deze auteurs hebben in gelijke mate bijgedragen

Samenvatting

In dit artikel wordt beschreven hoe actuele lokale luchtkwaliteitsmetingen kunnen worden gebruikt als input voor een dynamisch verkeersmanagement systeem. Zo wordt het haalbaar uitstoot reducerende maatregelen juist dan in te zetten wanneer deze nodig zijn. De verkeersmanagement-strategie wordt zo aangepast dat lokale luchtkwaliteit in een stedelijke omgeving verbetert.

Inleiding

De binnenstedelijke luchtkwaliteit is al jaren een hot topic. Europese regelgeving dwingt lokale autoriteiten om actie te ondernemen om de luchtkwaliteit te verbeteren, omdat een slechte luchtkwaliteit zowel op korte als op lange termijn een negatief effect heeft op de gezondheid van burgers [1]. Het is daarom van belang om voortdurend toezicht te houden op de luchtkwaliteit en deze te verbeteren.

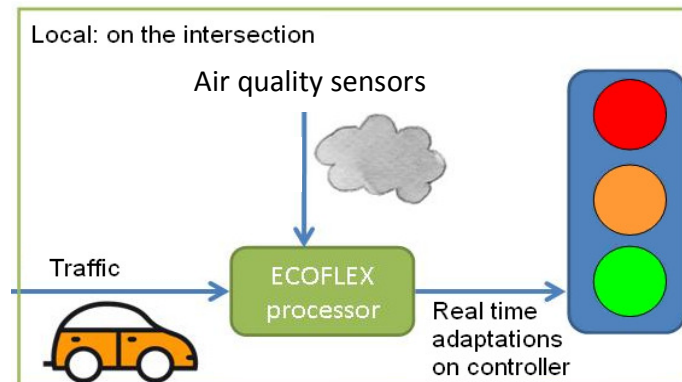
Verkeer levert een belangrijke bijdrage aan stedelijke luchtverontreiniging. Daarom is het belangrijk om emissies van voertuigen te verminderen, waarbij stedelijke bereikbaarheid en doorstroming randvoorwaarden zijn. Er zijn echter binnenstedelijk nog zeer veel zogeheten hotspots: plekken waar zeer lokaal de luchtkwaliteitsnormen (tijdelijk) worden overschreden. Voortdurende ontwikkeling in luchtvervuilings monitoring maakt het mogelijk deze hotspots te herkennen, maar er zijn tot op heden geen systemen die lokaal dynamisch kunnen sturen op verbetering van luchtkwaliteit, om zo aan de regelgeving te kunnen voldoen.

Een mogelijkheid om dit te integreren is om verkeersstromen te optimaliseren met Dynamisch Verkeers Management (DVM). DVM kan lokale emissies verlagen door middel van maatregelen die de snelheidsdynamiek van de individuele voertuigen stroomlijnt, zoals door het verminderen van het aantal acceleraties en deceleraties [2-4]. In het geval van geregelde kruispunten kan het aantal stops voor het gemotoriseerde verkeer worden verminderd door het aanpassen van de groentijden voor de verschillende richtingen. In een stedelijke omgeving is hierbij altijd sprake van een compromis. Korte cyclustijden leiden tot korte wachttijden voor langzaam verkeer, zoals voetgangers en fietsers, maar leiden tot extra stops voor het gemotoriseerde verkeer, waardoor de luchtkwaliteit lokaal afneemt en andersom.

Daarom is het aantrekkelijk om real time de juiste strategie te kiezen [5]. Er is winst te behalen met een eenvoudig DVM systeem dat alleen wordt getriggerd wanneer een bepaalde drempel voor de luchtkwaliteit wordt overschreden. Dit concept heet Groen DVM en is getest in het EcoFLEX-project in een pilot op het stedelijk niveau in de stad Helmond.

Het EcoFLEX project

Het doel van het EcoFLEX-project is het aantonen van het principe van Groen DVM voor het verlagen van voertuigemissies, op basis van de real-time lokale luchtkwaliteit, zie figuur 1. EcoFLEX heeft een emissiereductiedoelstelling van 15%, wat een rechtstreekse impact op de lokale luchtkwaliteit heeft.

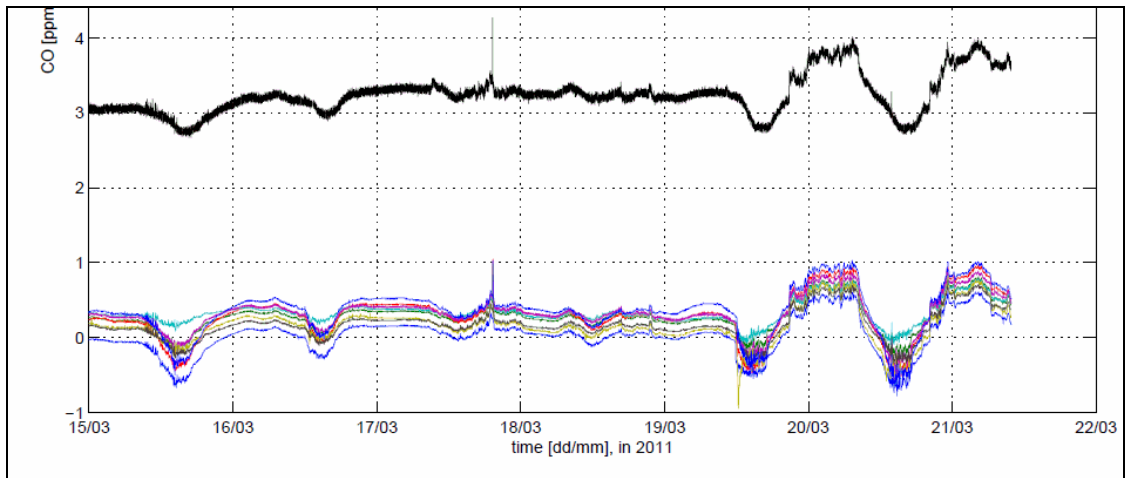


Figuur 1: De opzet van het EcoFLEX systeem

Voor het bereiken van het doel van dit project, moeten drie hoofdcomponenten worden geïntegreerd: de luchtkwaliteitsmetingen, de optimalisatie van de verkeersstrategie en de ontwikkeling van de milieutrigger die verantwoordelijk is voor het schakelen tussen de verschillende verkeersregelscenario's. In de volgende paragrafen worden deze drie onderwerpen besproken. Daarna wordt de pilot-locatie en de implementatie van het systeem beschreven. Het artikel sluit af met de resultaten en conclusie.

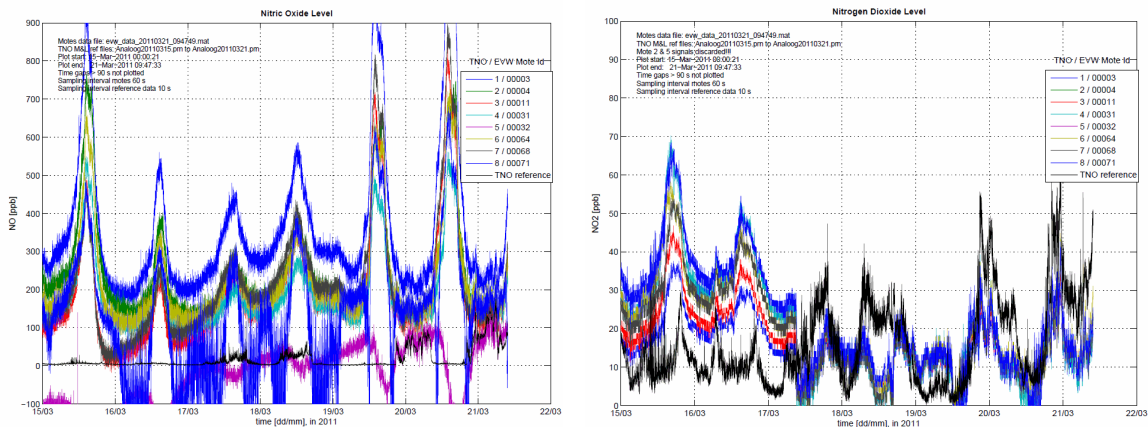
Luchtkwaliteit sensoren

Normaliter worden luchtkwaliteitsmetingen uitgevoerd op enkele vaste locaties in een groot stedelijk gebied op dag- of uur basis. Deze metingen worden gebruikt om trends in luchtkwaliteit bij te houden en te controleren op het overschrijden van de grenswaarden. Echter, wanneer men luchtkwaliteitsmetingen wil gebruiken als een indicator om onmiddellijk maatregelen te nemen om hotspots te voorkomen, zijn meer gedetailleerde gegevens in tijd en ruimte nodig. Hiervoor werd een low-cost sensornetwerk voor luchtkwaliteit ontwikkeld in het MESSAGE project door de Universiteit van Newcastle [6]. Deze sensoren zijn nu gecommmercialiseerd door het bedrijf EnviroWatch. Een sensor netwerk van acht van deze sensorunits, elk met een NO, NO₂, en CO sensor, werd getest voor dit project. De conclusie is dat de betrouwbaarheid nog niet goed genoeg is om deze sensoriek in te zetten als indicator voor de milieutrigger: Afgezien van een offset die kan worden gekalibreerd, presteert de CO-sensor goed wanneer deze wordt vergeleken met een nauwkeurige CO referentie-monitor, zie figuur 2. Echter, CO is niet eenvoudig toepasbaar als milieutrigger voor de uitstoot door verkeer, omdat CO door chemische reacties in de atmosfeer weggeaagt. Deze chemische reactie is afhankelijk van atmosferische omstandigheden die variëren per dag, waardoor CO niet geschikt is voor gebruik in een milieutrigger.



Figuur 2: Vergelijking van de CO metingen door de EnviroWatch sensoren (gekleurde lijnen) en de CO referentie monitor (zwarte lijn).

De NO en NO₂ sensoren tonen slechte correlatie met een accurate NO_x referentie monitor. De NO-sensor leek meer op temperatuur en luchtvochtigheid te reageren in plaats van op de NO-concentratie en hoewel de NO₂-sensor een beter resultaat gaf na het gebruik van geoptimaliseerde kalibratie parameters, toont ook deze nog steeds onverklaarbare verschillen, zie figuur 3. Een beter kalibratie algoritme, dat de gelijktijdig gemeten temperatuur en luchtvochtigheid signalen gebruikt, toonde veel betere overeenstemming tussen de EnviroWatch sensor resultaten voor NO en NO₂ en de NO_x-referentie-monitor, maar kon nog niet worden toegepast in real time.



Figuur 3: links) vergelijking van de NO signalen (gekleurd) en de NO monitor (zwart) rechts) Vergelijking van de NO₂ signalen (gekleurd) en de NO₂ monitor (zwart). Er is duidelijk te zien dat op 17 maart een nieuwe set kalibratie parameters is geladen.

Om deze redenen werd besloten het EnviroWatch sensor netwerk niet te gebruiken als input voor de milieutrigger. In plaats daarvan werden twee andere monitoren onderzocht als mogelijke input

voor de trigger: de NO_x -referentie-monitor en een monitor die het roetgehalte van fijnstof meet, ook wel bekend als black carbon monitor (MAAP). Beide signalen gaven een vergelijkbaar beeld van de luchtkwaliteit en waren beide geschikt als een trigger. Er is voor gekozen om black carbon te gebruiken als een triggersignaal voor de pilot. De reden hiervoor is dat black carbon een goede indicator is van vervuiling door gemotoriseerd verkeer en steeds vaker wordt gebruikt in studies vanwege de associatie met effecten op de gezondheid [7].

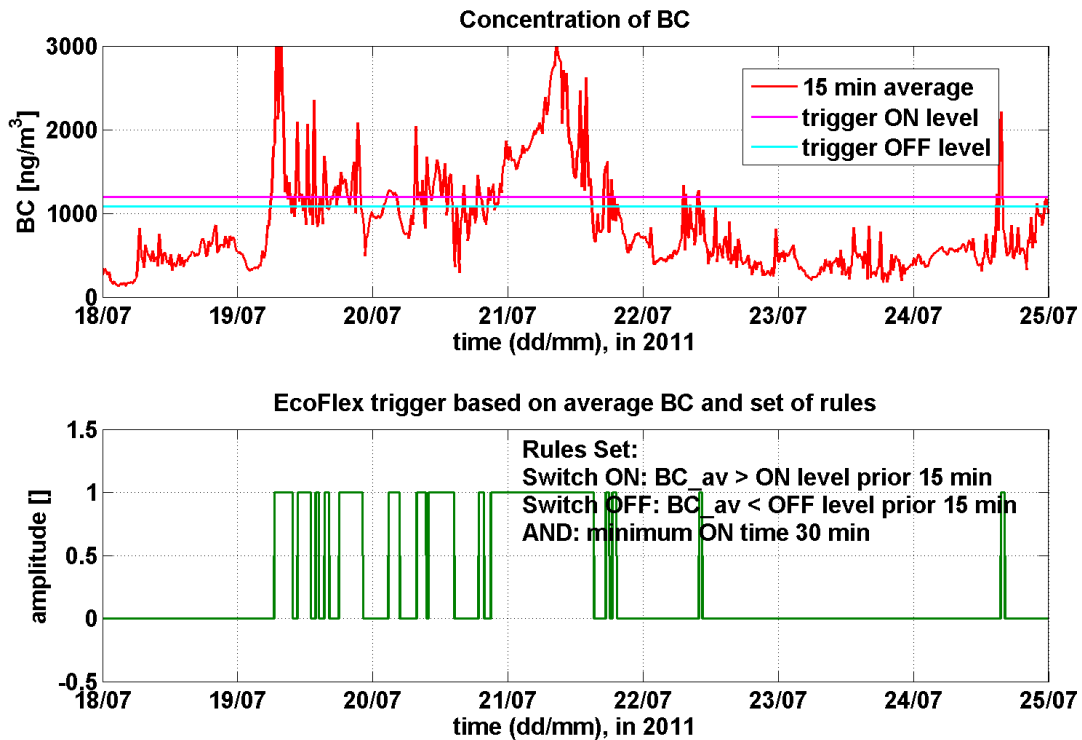
Ontwikkeling milieutrigger

De milieutrigger is ontwikkeld op basis van de amplitude van het black carbon signaal. De luchtkwaliteit is gemeten gedurende drie maanden en effecten van wind, spits, weekends en feestdagen op de luchtkwaliteit zijn onderzocht. Uit deze studie werden de twee drempels gedefinieerd om te schakelen tussen de EcoFLEX- en standaard modus.

Vanwege de veiligheid op de kruispunten, is het belangrijk om een zekere stabiliteit in de verkeersregeling te garanderen. Dit betekent dat het niet wenselijk is om elke minuut van strategie te switchen, maar minimaal een half uur in de aangenomen stand te blijven. Dit is gewaarborgd op drie manieren: ten eerste wordt het black carbon-sigitaal omgerekend van een één-minuut signaal naar een lopend gemiddelde over een kwartier. Dit stabiliseert het signaal en verwijdert hoge pieken veroorzaakt door bijvoorbeeld het passeren van vrachtwagens. De tweede manier is het gebruik van een hogere drempel voor het inschakelen van de EcoFLEX-modus dan de drempel voor het terugschakelen naar het standaard controle-scenario, wat flutter gedrag voorkomt. Ten derde moet het lopend gemiddelde de relevante drempel minimaal een kwartier overtreffen voor er wordt omgeschakeld. Dit leidt tot een stabiel verkeersbeeld dat een paar keer per dag schakelt op dagen met slechte luchtkwaliteit en in de standaard mode blijft op dagen met een goede luchtkwaliteit.

Het lopend gemiddelde van het black carbon-sigitaal, de drempels en het bijbehorende trigger-algoritme is te zien in figuur 4.

TNO EcoFlex Emission Based Traffic Light Regime Triggering



Figuur 4: boven) Het lopend gemiddelde en de grenswaardes
 onder) Het corresponderende trigger signaal; 1 staat voor het EcoFLEX scenario

Optimalisatie van de verkeersregeling

Het is erg lastig om universele gewichten toe te kennen aan de conflicterende doelen 'doorstroom voor gemotoriseerd verkeer' en 'korte wachttijd voor langzaam verkeer'.

In plaats daarvan zou het erg nuttig zijn om te kunnen overschakelen naar een lage-uitstoot instelling wanneer *nodig*, wanneer de luchtkwaliteit slecht is, en prioriteren op langzaam verkeer wanneer het *mogelijk* is, wanneer de luchtkwaliteit het toelaat.

Daarom is de verkeersregelaar uitgebreid met de EcoFLEX-processor, die real-time gegevens over de luchtkwaliteit verwerkt zoals eerder beschreven. Op basis van de verwerkte sensorgegevens wordt een stuursignaal gegenereerd. Dit signaal bepaalt welke strategie wordt gebruikt:

- Als de lucht kwaliteit goed is, dan houdt het systeem cyclustijden kort, waardoor het wachttijden voor langzaam verkeer en zijstraten laag houdt. Dit is dezelfde regelstrategie als vòòr de pilot, ('standaard' modus).
- Als de luchtkwaliteit te slecht wordt, dan schakelt het systeem naar minimaliseren van stops voor het gemotoriseerde verkeer op de hoofdrichting ('EcoFLEX' modus).

De EcoFLEX modus blijft actief tot de luchtkwaliteit genoeg verbeterd is en de drempel bereikt om terug te schakelen naar de standaard strategie.

EcoFLEX kan worden toegepast op losstaand gecontroleerde kruispunten, maar netwerken zijn

ook mogelijk, wat een verdere toename betekent van de voordelen voor het milieu. In dat geval is een centrale EcoFLEX applicatie nodig die draait in het verkeers management centrum, die milieu-indicatoren optimaliseert over een heel netwerk.

Implementatie van de pilot

De pilot heeft in totaal 5 maanden gelopen, en had twee hoofddoelen:

1. Test de effectiviteit van het EcoFLEX-scenario vergeleken met het standaard scenario met betrekking tot doorstroming en het verlagen van de verkeersemisssies.
2. Bewijs de werking van het principe, van schakelen tussen de twee scenario's op basis van de actuele luchtkwaliteit.

De testperiode is opgesplitst in drie delen: eerst heeft het standaard scenario vier weken gedraaid, en vervolgens het EcoFLEX-scenario zes weken. Deze perioden zijn gebruikt om de effectiviteit van het EcoFLEX-scenario te vergelijken met het standaard scenario. De monitoren in de trailer werden gebruikt om de impact te analyseren van de verkeersbijdrage aan de luchtkwaliteit. In het derde deel is echt geschakeld op basis van real-time metingen van de luchtkwaliteit. Deze periode diende om aan te tonen dat het technisch mogelijk is te schakelen op basis van een milieutriger.

Pilot locatie

De pilot locatie is een kruispunt in de stad Helmond. Het betreft een T-kruising voor gemotoriseerd verkeer, de vierde richting is alleen toegankelijk voor voetgangers en fietsers, zie Figuur 5.

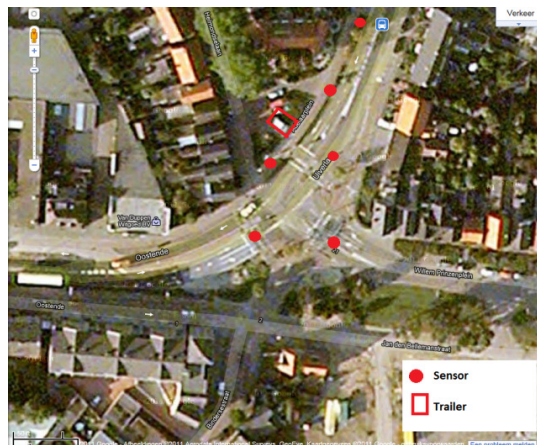


Figuur 5: links) De T kruising die gebruikt is in de pilot. rechts) De parkeerplaats waar de aanhanger stond met de meetapparatuur, met daarachter de kruising. Bron: Google maps

Een aanhangwagen (zie Figuur 7, rechts) met de black carbon- en NO_x monitoren is geparkeerd op de parkeerplaats dichtbij de hoofdweg. De trailer bevatte ook de gateway, die de gegevens van het draadloze sensor netwerk ontvangt, een weerstation en de server die alle meetgegevens

verzamelt en opslaat, en de trigger status berekent. De trailer is aangesloten op de verkeersregelaar door een netwerk kabel. De black carbon-monitor meet de actuele luchtkwaliteit, de server verwerkt dit signaal en stuurde een 'hoog' of 'laag' signaal naar de regelaar die op zijn beurt schakelt tussen de twee scenario's.

Er is besloten om toch zes van de EnviroWatch sensoren te installeren op de pilot locatie, maar niet om te gebruiken als trigger signaal. Op deze manier is het mogelijk om ervaring op te doen met de sensoren en het netwerk zodanig dat de volgende stap op weg naar de toepassing van dit netwerk kleiner zal zijn. Op het moment van schrijven zijn deze gegevens nog niet geanalyseerd.



Figuur 6: De locatie van de sensoren en de aanhanger. Bron: Google maps



Figuur 7: links) Een EnviroWatch sensor, bevestigd aan een straatlantaarn naast een camera rechts) de aanhanger met de instrumenten

Resultaten

De EcoFLEX-pilot in Helmond heeft geleid tot twee belangrijke resultaten.

In de eerste plaats, de uitvoering van de EcoFLEX-pilot heeft bewezen dat het technisch mogelijk is om de actuele luchtkwaliteit te meten en te gebruiken om de verkeersregeling daarop aan te passen, zonder enige menselijke tussenkomst.

Het tweede resultaat betreft de effectiviteit van het EcoFLEX-scenario. De monitoren in de trailer, gecorrigeerd met achtergrondmetingen, zijn gebruikt om de effectiviteit van de regelstrategie te bepalen. De trailer was gelegen ten noordwesten van de kruising, wat inhoudt dat de wind uit het zuidoosten moet waaien om de bijdrage van het verkeer op de luchtkwaliteit te meten. Echter, er is op de aanhanger nauwelijks wind uit zuidoostelijke richting gemeten. Bij het vergelijken van de lokale windmetingen met de metingen van het KNMI, bleek dat delen van onze lokale windmetingen niet overeenkomen met hun metingen. Dit kan alleen verklaard worden door de lokale invloeden van gebouwen rond het kruispunt op de windrichting. De meest waarschijnlijke verklaring voor dit fenomeen is dat turbulentie door de omliggende gebouwen (bijvoorbeeld het donkergrijze gebouw in figuur 5) de luchtkwaliteitsmetingen heeft verstoord. Dit betekent dat er geen relevante conclusies met betrekking tot de doeltreffendheid van het controle-scenario kunnen worden getrokken uit de metingen van de luchtkwaliteit. Daarom worden alle conclusies met betrekking tot de emissiereductie gebaseerd op uitstoot simulaties en het verkeersmetingen gedaan door de verkeersregelaar tijdens de pilot (log-bestanden).

Simulatie studie

Vooraf zijn in een VISSIM verkeerssimulatie de twee scenario's op een aantal kenmerken vergeleken voor de twee spits periodes, zie onderstaande tabel 1. Voor het schatten van emissies zijn de interessante kenmerken het aantal stops, gemiddelde snelheid, en als een indicatie van het aantal stops: wachtrijlengtes.

Tabel 1. Verkeersmetingen uit VISSIM simulatie

	Standaard	EcoFLEX	verschil	percentage
Gemiddeld aantal stops				
Ochtendspits	2,2	2	-0,2	-9
Avondspits	2,9	2,4	-0,5	-17
Gemiddelde snelheid (op Uiverlaan) (km/u)				
Ochtendspits	31,4	37,7	6,3	20
Avondspits	31,3	41,4	10,1	32
Gemiddelde wachtrijlengte op hoofdrichtingen				
Ochtendspits	7,5	3,5	-4	-53
Avondspits	12	7,5	-4,5	-38

We zien een significante daling van het aantal stops en zeker in de gemiddelde lengte van de wachtrij. Gemiddelde snelheid neemt naar verhouding toe.

Pilot data uit de praktijk

De verkeersregelaar logt informatie over de wachtrij lengte, informatie over verkeersintensiteiten etcetera. Voor de volgende vergelijking, zijn twee weken van de log gegevens gebruikt: de laatste week van de eerste periode (standaard modus) en de eerste week van de tweede periode (EcoFLEX modus). Op deze manier zijn variaties in weersomstandigheden, verkeersintensiteiten en andere invloeden minimaal.

De wachtrij-informatie van de straat metingen is opgegeven per richting, figuur 8 laat zien welke wachtrij overeenkomt met welke richting.



Figuur 8: plattegrond met straatnamen

Tabel 2. Gemiddelde wachtrijlengtes, metingen van straat

	Standaard	EcoFLEX	verschil	percentage
Ochtendspits				
Zijstraat	0,89	1,04	0,15	17
Uiverlaan rechtdoor (hoofdrichting)	0,76	0,57	-0,19	-25
Uiverlaan linksaf	0,00	0,25	0,25	
Oostende rechtsaf	0,51	0,89	0,38	73
Oostende rechtdoor (hoofdrichting)	2,67	0,17	-2,50	-94
Avondspits				
Zijstraat	1,22	1,51	0,29	24
Uiverlaan rechtdoor (hoofdrichting)	0,28	0,18	-0,10	-35
Uiverlaan linksaf	0,00	0,69	0,69	
Oostende rechtsaf	1,19	0,72	-0,47	-40
Oostende rechtdoor (hoofdrichting)	6,81	1,00	-5,81	-85
Hele dag				
Zijstraat	0,42	0,70	0,28	66
Uiverlaan rechtdoor (hoofdrichting)	0,19	0,16	-0,03	-15
Uiverlaan linksaf	0,00	0,29	0,28	
Oostende rechtsaf	0,77	0,43	-0,34	-44
Oostende rechtdoor (hoofdrichting)	2,75	0,29	-2,47	-90

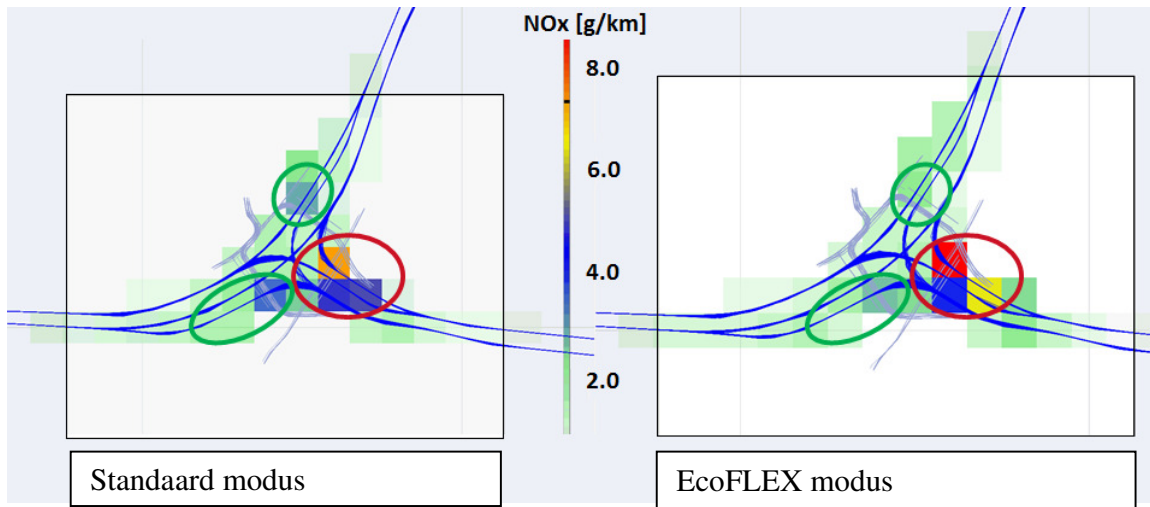
De gemeten waarden op straat zijn een factor lager dan de wachtrij metingen van simulatie. De verhoudingen zijn echter hetzelfde. Deze discrepantie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een andere interpretatie van 'gemiddelde wachtrij'. De straat logging middelt ook over tijd wanneer er geen wachtrij staat, en het lijkt erop dat de simulatie berekening dat niet doet.

Algemeen zien we dezelfde trends in afname van de lengte van de wachtrij, waardoor we ervan overtuigd zijn dat de simulatie de straat situatie goed nabootst.

Het aantal stops is afgenomen en de gemiddelde snelheid wordt verhoogd, twee veranderingen die gunstig zijn voor de emissies van voertuigen.

Emissie simulatie studie

Aangezien het onmogelijk bleek de effectiviteit van de EcoFLEX regeling direct te meten, is er gezocht naar een alternatieve oplossing om een uitspraak hierover te doen. Aangezien resultaten van de verkeerssimulaties realistisch bleken t.o.v. de gemeten situatie, zijn deze als input gebruik voor de emissieberekeningen. De output van de VISSIM simulaties voor de spits zijn geïmporteerd in EnViver, de emissieberekening software die is ontwikkeld door TNO op basis van de VERSIT + modellen [8]. In Figuur 9 is de uitkomst van de emissie-simulatie weergegeven.



Figuur 9 De EnViver simulaties. Het is duidelijk te zien dat de emissies afnemen op de hoofdrichtingen (groene ovalen), terwijl emissies op de zijrichting toenemen (rode ovaal)

Op de hoofdrichting (west - noord), zijn de emissies duidelijk verminderd, terwijl de emissies op de zijrichting omhoog gaan. De totale som van de emissies op het kruispunt is echter afgenomen, aangezien het totaal aantal voertuigen, en dus de kilometers gereden, op de hoofdrichting veel hoger is dan op de zijweg. De totale reductie bereikt door de EcoFLEX-controle strategie is 8,2% voor NO_x.

Conclusie

De EcoFLEX pilot heeft bewezen dat het technisch mogelijk is om te schakelen tussen de verschillende verkeersregelsscenario's op basis van actuele lokale luchtkwaliteitsmetingen.

Door het verlengen van de groen-tijden in het EcoFLEX-scenario voor de hoofdverkeersstromen, is de gemiddelde wachtrij voor de totale kruising met 38-52% in de spitsperiodes afgenomen. Dit leidt tot minder stops voor het gemotoriseerde verkeer en dus tot een aanzienlijke vermindering van de uitstoot. Ook de gemiddelde snelheid gaat omhoog wat gunstig is voor emissiereductie. Emissie simulaties voor de kruising geven een 8,2% daling van de NO_x, wat direct bijdraagt aan de verbetering van de luchtkwaliteit.

De volgende stap naar de uitvoering van het EcoFLEX-concept is het gebruik van een low-cost sensor netwerk dat een beter ruimtelijk inzicht geeft in de luchtkwaliteit op de kruising, eenvoudigere implementatie door het draadloze karakter van de sensoren en lagere kosten, waardoor het aantrekkelijk wordt voor de lokale overheden dit systeem toe te passen. Hoewel de EnviroWatch sensoren zijn verbeterd in het afgelopen jaar, zijn er nog stappen nodig voor deze sensoren geschikt zijn om gebruikt te worden in het EcoFLEX-concept.

Dankwoord

EcoFLEX is een project dat wordt mogelijk gemaakt door een subsidie van de provincie Noord-Brabant: "Innovaties luchtkwaliteit". Op initiatief van het "Samenwerkingsverband Regio Eindhoven" (SRE) en "Beter Bereikbaar Zuidoost-Brabant", is een subsidie-programma opgezet voor verbetering van luchtkwaliteit. Met dit initiatief hebben de samenwerkende gemeenten het bedrijfsleven uitgedaagd om innovatieve technische oplossingen te ontwikkelen op het gebied van luchtkwaliteit en verkeer. TNO en PEEK zijn gezamenlijk deze technische uitdaging aangegaan. Wij zouden ook graag de gemeente Helmond bedanken voor hun medewerking tijdens de uitvoering van de pilot. Zonder hun steun zou deze pilot niet mogelijk zijn geweest.

Referenties

- [1] World Health Organisation. Health effects of transport-related air pollution, World Health Organisation Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.2005, ISBN 92-890-1373-7
- [2] Hirschmann, K. and Fellendorf, M., “A toolbox to quantify emission reductions due to signal control,” *89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.: 2010.
- [3] Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, H. and Breunese, E. “Reduction of Travel Times and Traffic Emissions Using Model Predictive Control,” *American Control Conference*, 2009.
- [4] Mahmod, M., van Arem, B., Pueboobpaphan, R. and Igamberdiev, M. “Modeling reduced traffic emissions in urban areas: the impact of demand control, banning heavy duty vehicles, speed restriction and adaptive cruise control,” *89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.: 2010.
- [5] Elshout, S.V.D. Mahmod, M. Arts, I. and van Arem, B., Decision making on short term traffic measures to influence traffic related air pollution., University of Twente, 2009.
- [6] North, Robin J et al., “Field Deployments of the MESSAGE System for Environmental Monitoring”, TRB Volume: 50 Issue Number: 11, Publisher: Hemming Group, Limited ISSN: 0041-0683, 2010
- [7] Janssen, N.A.H., Hoek, G., Lawson-Simic, M., Fischer, P., Bree van, L., Brink van, H., Keuken, M., Atkinson, R., Anderson, H.R., Brunekreef, B. and Cassee, F. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared to PM10 and PM2.5. *Environmental Health Perspective*, submitted for publication
- [8] www.tno.nl/enviver