

# Lessons Learned: meten van en rekenen aan luchtkwaliteit

**Ervaringen binnen het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit met het meten van en rekenen aan luchtkwaliteit**

Rapportnummer IPL-9

## Colofon

Titel	Lessons Learned: Meten van en rekenen aan luchtkwaliteit
Ondertitel	Ervaringen binnen het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit met het meten van en rekenen aan luchtkwaliteit
Opdrachtgever	Ministerie van Verkeer en Waterstaat (V&W) Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM)
Uitgevoerd door	Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart Afdeling Innovatie & Implementatie (MII); Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL)
Informatie	DVS-loket Tel. (088) 798 25 55 E-mail: dvsloket@rws.nl
Dit rapport is samengesteld door	Theo Cornelissen (DVS) Leon Kok (DVS) Lotje van Ooststroom (DVS)
Auteurs van onderliggende rapporten	Jan Duyzer (TNO) Jan Hooghwerff (M+P) Henk Spoelstra (KEMA) Christiaan Tollenaar (M+P) Marita Voogt (TNO)
Datum van publicatie	December 2009
Rapport downloaden	<a href="http://www.verkeerenwaterstaat.nl">www.verkeerenwaterstaat.nl</a> (actueel/publicaties)
Trefwoorden	Luchtkwaliteit, meten, rekenen, windtunnel, CFD, meetapparatuur
Copyright	Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft 2009

**Disclaimer**

Dit rapport is opgesteld in het kader van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (2005 – 2009) dat in opdracht van de ministeries van Verkeer en Waterstaat en VROM werkt aan innovatieve oplossingen die bijdragen aan verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. Rijkswaterstaat voert het programma uit.

Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS), en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben de in deze publicatie opgenomen gegevens zorgvuldig verzameld naar de laatste stand van wetenschap en techniek.

Desondanks kunnen er onjuistheden in deze publicatie voorkomen.

Rijkswaterstaat sluit, mede ten behoeve van degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die uit het gebruik van de hierin opgenomen gegevens mocht voortvloeien.

# Inhoud

## **Algemene inleiding 6**

### **DEEL A: CFD-modellering 7**

- 1 Inleiding** Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
- 1.1 Doelstelling 8
- 1.2 Toegepaste CFD-modellen 8
- 1.3 Algemene bevindingen 8
- 1.4 Specifieke CFD-modelleringsaspecten 9
- 1.5 Presentatietechnieken 9
- 1.6 Benchmark berekeningsresultaten 10
- 1.7 Vergelijking met de Proeftuin Schermen 10

### **2 Workshop 11**

- 2.1 Inleiding 11
- 2.2 CFD-Aanbevelingen 11

### **DEEL B: Windtunnelonderzoek 15**

#### **1 Achtergrond en inleiding 16**

#### **2 Opzet benchmark 17**

- 2.1 Doel 17
- 2.2 Uitgangspunten 17
- 2.3 Deelnemers 17

#### **3 Uitvoering benchmark 18**

- 3.1 Becomentariëring door de drie instituten 18
- 3.2 Aangeleverde meetgegevens en rapportages 18

#### **4 Vergelijking meetresultaten 20**

- 4.1 Concentratiecoëfficiënten 20
- 4.2 Bronsterkte onafhankelijkheid 22
- 4.3 Schermeffecten 23
- 4.4 Herhalingsmetingen 27

#### **5 Evaluatie benchmark en conclusies 29**

- 5.1 Uitvoering benchmark 29
- 5.2 Vergelijking meetresultaten 30
- 5.3 Conclusies 31

### **Deel C: Meten aan luchtkwaliteit in praktijksituatie 33**

#### **1 Inleiding 34**

- 1.1 Innovatieprogramma Luchtkwaliteit 34
- 1.2 Projecten 34
- 1.3 Leeswijzer 36

#### **2 Methodieken 37**

- 2.1 Inleiding 37
- 2.2 Informatie 38
- 2.3 Evaluatie 42

### **3           Apparatuur 46**

- 3.1 Inleiding 46
- 3.2 Informatie 46
- 3.3 Veelgebruikte apparatuur 46
- 3.4 Evaluatie 50

### **4           Analysemethoden 54**

- 4.1 Inleiding 54
- 4.2 Informatie 54
- 4.3 Evaluatie 59

### **5           Onzekerheden 64**

- 5.1 Inleiding 64
- 5.2 Informatie 64
- 5.3 Evaluatie 65

### **6           Praktijk en kwaliteitsborging 67**

- 6.1 Inleiding 67
- 6.2 Informatie 67
- 6.3 Evaluatie 68

### **7           Discussie en conclusies 70**

#### **Conclusies 73**

#### **Bijlagen op cd-rom**

- Bijlage A.1      Benchmark CFD-modelleringen, Eindrapport ringonderzoek naar de resultaten van CFD-modelleringen van de "Proeftuin" door vier verschillende bureau's, november 2009, KEMA
- Bijlage A.2      VERSLAG van Workshop CFD-Aanbevelingen Gehouden bij RWS in Delft op 2 november 2009
- Bijlage B        Benchmark windtunnelonderzoek, Ringonderzoek naar de resultaten van windtunnelonderzoeken door drie verschillende instituten aan geluidsschermen zoals toegepast in de "Proeftuin", november 2009, KEMA
- Bijlage C        Lessons Learned Luchtmetingen, november 2009, M+P en TNO

## Algemene inleiding

In de vijf jaar van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit zijn internationale onderzoeken op het gebied van luchtkwaliteit geïnventariseerd en naast elkaar gelegd. Doel was om te zoeken naar kansrijke, nieuwe ideeën om luchtkwaliteit te verbeteren. Vervolgens zijn er verdere onderzoeken uitgevoerd zoals bureaustudies, modelberekeningen, laboratoriumonderzoek én unieke, grootschalige praktijkproeven. Hierbij is samengewerkt met kennis- en onderzoeksinstituten, andere overheden en marktpartijen. Andere onderzoeken die zijn en worden uitgevoerd in binnen- en buitenland zijn zoveel mogelijk beschouwd en meegenomen in de onderzoeken die door het IPL zijn uitgevoerd. Bij de uitvoering van de grootschalige praktijkproeven zijn erkende (internationale) wetenschappers betrokken.

Tijdens de uitvoer van de onderzoeken is o.a. ervaring opgedaan met:

- Het uitvoeren van berekeningen met CFD (Computational Fluid Dynamics)
- Het uitvoeren van windtunnelproeven
- Het uitvoeren van metingen in het veld

De kennis die hiermee is opgedaan in het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit wordt ontsloten in deze publicatie en daarmee toegankelijk voor anderen.

Bij de totstandkoming van deze publicatie is gebruik gemaakt van de volgende documenten:

- Benchmark CFD-modelleringen, Eindrapport ringonderzoek naar de resultaten van CFD-modelleringen van de "Proeftuin" door vier verschillende bureaus, november 2009, KEMA
- VERSLAG van Workshop CFD-Aanbevelingen Gehouden bij RWS in Delft op 2 november 2009
- Benchmark windtunnelonderzoek, Ringonderzoek naar de resultaten van windtunnelonderzoeken door drie verschillende instituten aan geluidsschermen zoals toegepast in de "Proeftuin", november 2009, KEMA
- Lessons Learned Luchtmetingen, november 2009, M+P en TNO

Deze publicaties zijn integraal opgenomen op de cd-rom in de achterkaft.

### *Leeswijzer*

Deel A bespreekt de ervaringen met CFD (Computational Fluid Dynamics), die zijn opgedaan in het onderzoek naar schermwerking op de luchtkwaliteit.

In deel B wordt een verslag gedaan van het ringonderzoek met 3 windtunnelbedrijven. In dit ringonderzoek worden de resultaten van de Proeftuin Schermen vergeleken met de resultaten van 3 windtunnels waarin de situatie van de proeftuin is nagebouwd.

In deel C tenslotte worden de ervaringen gedeeld ten aanzien van de luchtkwaliteitsmetingen in de buitenlucht die bij verschillende grootschalige praktijkproeven zijn uitgevoerd in het kader van het IPL.

# DEEL A: CFD-modellering

# 1 Benchmark

## 1.1 Doelstelling

Omdat het IPL geïnteresseerd is in de toepassing van CFD-modelleringen voor luchtkwaliteitstudies, is een benchmark opgezet om de verschillende CFD-modellen onderling te vergelijken. Hierbij is de opzet met de geluidsschermen in het lopende onderzoek naar de verbetering van de luchtkwaliteit in de "Proeftuin" als basis en referentie voor de CFD-modelleringen gebruikt. Hierdoor kan in een later stadium een vergelijking worden gemaakt met de werkelijke gemeten schermeffecten in de "Proeftuin".

In deze rapportage wordt een samenvatting gegeven van de evaluatie van het gehele proces, de opzet van de benchmark, de resultaten van de benchmark en conclusies ten aanzien van de mogelijkheden van CFD-modelleringen ten behoeve van luchtkwaliteitstudies. Het gehele rapport is terug te vinden als bijlage A.1 op de cd-rom.

In het onderzoek hebben vier bureaus CFD-modelleringen uitgevoerd op basis van een aantal geformuleerde uitgangspunten en criteria die aan de modelleringen werden gesteld. De rapportages door de vier bureaus omvatte het aanleveren van numerieke berekeningsresultaten voor een aantal meteo-condities, het mondeling presenteren van de resultaten en een schriftelijke rapportage. De vier bureaus zijn geanonimiseerd tot B1, B2, B3 en B4.

Uit de mondelinge presentaties en schriftelijke rapportages zijn conclusies getrokken ten aanzien van CFD-modelleringen voor luchtkwaliteitsonderzoek en de numerieke berekeningsresultaten van de vier bureaus zijn nader statistisch verwerkt.

## 1.2 Toegepaste CFD-modellen

Door de vier bureaus zijn de volgende CFD-modellen toegepast:

- B1 Ansys CFX versie 11
- B2 Fluent 6.3 met Tree Model & Traffic Produced Turbulence Model
- B3 Fluidyn-Panair
- B4 COMSOL van MultiPhysics. Eindige elementen model (FEM)

## 1.3 Algemene bevindingen

Toepassing van CFD-berekeningen voor luchtkwaliteitsonderzoek is een nieuw aspect van een technologie die nog in ontwikkeling is. Deze technologie heeft potentieel, aangezien het aantal mogelijkheden en processen dat beschreven kan worden (erg) groot is. Zo kunnen er bijvoorbeeld ook thermische effecten en chemische processen aan de modelleringen worden toegevoegd. CFD-modellering kan inzicht geven in de optredende verschijnselen en onderscheid mogelijk maken welke processen dominant zijn en welke niet.

Daarentegen kleven aan CFD-modelleringen ook de nodige bezwaren en zijn er valkuilen. Belangrijk is dat de CFD-berekeningen worden uitgevoerd door ervaren deskundigen. Het opbouwen van een goed en voldoende fijnmazig rekengrid is van essentieel belang en dit gebeurt deels intuïtief en is afhankelijk van de expertise van de CFD-modellieur en de mogelijkheden die binnen een bepaald rekenpakket



voorhanden zijn. Uit gesprekken met de CFD-modellereurs blijkt dat een aantal zaken lastig is om eenduidig naar objectieve aanbevelingen om te zetten, zoals:

- een goed atmosferische grenslaag model dat de ruwheidslengte goed vertaalt naar wind en turbulentie;
- wandeffecten, zoals de topvorm van het scherm, of een oppervlaktebron, waaruit een zekere emissie vrijkomt,
- de porositeit van een wand (waaronder begroeiing, zoals struiken en bomen); deze moeten namelijk met hulproutines in het model ingebracht worden.

De invloed van keuzes van sommige in te stellen parameters (bijvoorbeeld voertuig geïnduceerde turbulentie) blijken een grote invloed te hebben op het eindresultaat.

CFD-modelleringen voor luchtkwaliteitstudies zijn voornamelijk redelijk goed toepasbaar om de kwalitatieve invloed van een bepaalde parameter te berekenen. Kwantitatieve analyses, zoals het berekenen van jaargemiddelde concentraties, het aantal overschrijdingsdagen van  $PM_{10}$  of zelfs absolute concentraties met voldoende betrouwbaarheid zijn met CFD-modelleringen voornamelijk niet mogelijk.

Uit het gehele proces van de benchmark en uit de mondelinge en schriftelijk gerapporteerde resultaten blijkt dat de heldere en gedetailleerde formulering van de opdracht inclusief duidelijke en kwantitatieve formulering van de randvoorwaarden voor een uit te zetten CFD-modelleringsonderzoek van essentieel belang zijn.

#### **1.4 Specifieke CFD-modelleringsaspecten**

Uit de mondelinge presentaties en schriftelijke rapportages blijkt dat aan de volgende aspecten bij CFD-modelleringen de nodige aandacht en zorg dient te worden besteed:

- De opbouw van een goed gedefinieerd rekengrid is cruciaal. Hiervoor lijken echter (nog) geen vuistregels gegeven te kunnen worden.
- Om betrouwbare resultaten te verkrijgen is het nodig gevoeligheidsanalyses een serieuze plaats te geven in CFD-berekeningen en de rapportage ervan. Zonder deze is er onvoldoende grip op de resultaten. Bureaus B1 en B3 zijn hierin het verst gegaan.
- Het windprofiel is van belang: dit is niet altijd duidelijk gevalideerd.
- Aanwezigheid van andere versturende objecten in het rekendomein beïnvloeden de resultaten (veel) meer dan zo op het oog verwacht werd. Dit betekent in praktijk dat kwantitatieve schermeffecten op locaties waar deze schermen hun doel dienen (namelijk bewoners beschermen) met enige scepsis bekeken kunnen worden.
- Het gekozen turbulentiemodel is belangrijk: er kan geen uitsluitsel gegeven worden welke methode de voorkeur verdient.
- De gekozen ruwheid verschilt van model tot model. Dit heeft invloed op de berekende concentraties in de referentiesituatie (de ongestoorde toestand, zonder scherm) en dus op de berekende effectiviteit van de schermen. De ruwheid heeft weinig invloed op de concentratieprofielen achter het scherm.

#### **1.5 Presentatietechnieken**

Uit de mondelinge presentaties is duidelijk geworden dat een goede presentatie van de resultaten belangrijk is. Juist om het aspect "inzicht verkrijgen" goed uit de verf te laten komen zijn goede, inzichtelijke en soms ook gedetailleerde grafische presentaties (soms in de vorm van filmpjes) van belang. KEMA benadrukt dat de

kwaliteit van deze presentaties nog niets zegt over de kwaliteit van het voorspellend vermogen van de uitkomsten, maar – indien goed gemodelleerd – levert dit zeker een meerwaarde.

## 1.6 Benchmark berekeningsresultaten

Uit vergelijking van de berekeningsresultaten blijkt dat bureau B4 (ook na uitvoerige consultatie) globaal een factor tien lagere absolute concentraties rapporteert dan de overige bureaus. Lagere absolute concentraties hoeven geen belemmering te zijn voor het correct berekenen van schermeffecten, aangezien dit een relatief effect is. Desondanks blijken ook de schermeffecten bij bureau B4 overwegend negatief te zijn wat inhoudt dat achter de schermen hogere concentraties worden berekend dan in de ongestoorde situatie. In principe is dit niet onmogelijk: immers het schermeffect is de optelsom van in hoofdzaak twee effecten: afremming windveld (concentratieverhogend) en productie van extra turbulentie achter het scherm (concentratieverlagend). Omdat de resultaten van drie bureaus een consistente cluster vormen en de vierde hierbij uit de toon valt, wordt deze laatste als een uitbijter beschouwd.

Voor het berekenen van de statistische gegevens van gemiddelde en bandbreedte (uitgedrukt als 1 x standaarddeviatie) voor zowel de absolute concentraties op de aangegeven berekeningspunten als de schermeffecten zijn de resultaten van bureau B4 niet meegenomen.

Het blijkt dat de bandbreedte van de absolute concentraties van de bureaus (B1, B2 en B3) per berekeningspunt en gemiddeld over alle windrichtingen tussen  $\pm 20\%$  tot circa  $\pm 60\%$  ligt, afhankelijk van de afstand vanaf het scherm.

Het berekende schermeffect en de bandbreedte tussen de resultaten van drie bureaus B1, B2 en B3 is in onderstaande tabel weergegeven.

### Tabel

Overall gemiddeld berekend schermeffect in % met bandbreedte (1 x standaarddeviatie) van de resultaten van drie bureaus (B1, B2 en B3)

Wind-snelheid	Achter 4m scherm			Achter 7m scherm		
	5m	10m	28,5m	5m	10m	28,5m
3 m/s	17 $\pm$ 4	14 $\pm$ 4	13 $\pm$ 7	34 $\pm$ 7	31 $\pm$ 8	26 $\pm$ 10
6 m/s	20 $\pm$ 7	16 $\pm$ 8	16 $\pm$ 9	33 $\pm$ 5	30 $\pm$ 6	24 $\pm$ 8
12 m/s	11 $\pm$ 11	20 $\pm$ 13	17 $\pm$ 11	37 $\pm$ 8	35 $\pm$ 11	30 $\pm$ 14

## 1.7 Vergelijking met de Proeftuin Schermen

De schermeffecten bepaald uit de CFD-berekeningen op 5m en 10m afstand blijken lager te zijn, dan de vastgestelde schermeffecten in de Proeftuin bij een vergelijkbare windsnelheid. In onderstaande tabel is de vergelijking weergegeven.

### Tabel

Vergelijking schermeffecten tussen CFD-modelleringen en de Proeftuin

Schermeffect (%)	Achter 4m scherm			Achter 7 m scherm		
	5m	10m	28,5m	5m	10m	28,5m
CFD-berekeningen (bij 3 m/s)	17 ( $\pm 8$ )	14 ( $\pm 8$ )	13 ( $\pm 14$ )	34 ( $\pm 14$ )	31 ( $\pm 16$ )	26 ( $\pm 20$ )
Proeftuin (NO <sub>x</sub> )	27 ( $\pm 6$ )	20 ( $\pm 6$ )	13 ( $\pm 7$ )	46 ( $\pm 13$ )	42 ( $\pm 13$ )	25 ( $\pm 15$ )

## 2 Workshop

### 2.1 Inleiding

Op 2 november 2009 is een workshop georganiseerd. Na het in viervoud uitvoeren van de CFD-berekeningen aan de schermen bij Nulde en het vergelijken van deze resultaten, werd het zinnig geacht om eens open te discussiëren over de aanpak en keuzes in CFD-modellering van schermconstructies. Tevens is de mogelijkheid onderzocht om te komen tot een set aanbevelingen voor het (laten) uitvoeren van CFD-analyses.

Hierbij waren aanwezig:

De vier CFD modellers:

- DGMR Erik den Tonkelaar, Hans van Leeuwen
- Haskoning Bing Yu
- NRG Govert de With
- TNO Ernst Meijer, Sjoerd van Ratingen

Externe experts:

- TU-Delft Harmen Jonker
- VITO Clemens Mensink

Gastheer RWS Niels Lanser, Leon Kok, Paul Fortuin, Theo Cornelissen

Workshop hosting KEMA Hans Erbrink, Joost de Wolff

Het totale verslag is opgenomen in bijlage A1.2 op de cdrom.

### 2.2 CFD-Aanbevelingen

In het kader van het Innovatief Programma Luchtkwaliteit heeft RWS ervaring opgedaan met het voorspellen van het effect van een scherm op de luchtkwaliteit, op basis van CFD modelleringen. RWS verwacht in de toekomst dat bij de volgende toepassingen CFD mogelijk een rol kan spelen:

- Bij meer complexe situaties bij snelwegen zoals bij tunnelmonden, knooppunten, dicht bijzijnde gebouwen/obstakels, etc.
- Situaties die vragen om een (uitgebreide) gevoeligheidsanalyse: bijvoorbeeld wanneer het van belang is om de invloed op de luchtkwaliteit te weten van de verschillende factoren (anders dan het scherm), hierbij wordt met name gedacht aan begroeiing of andere obstakels in de nabijheid van de weg en/of het scherm.
- Situaties waar voornamelijk de turbulentie door obstakels de luchtkwaliteit bepaalt; wanneer de atmosferische turbulentie overheerst, kunnen nu beter atmosferische grenslaagmodellen als rekenmodellen worden gebruikt. CFD kan in de toekomst mogelijk ook voor buitenstedelijke gebieden een rol spelen waarbij atmosferische stabiliteit van belang is (naarmate CFD's beter met (on)stabiliteit in de atmosfeer kunnen omgaan)

Voor CFD bestaan deels alternatieve modeltechnieken, die in sommige gevallen CFD berekeningen kunnen vervangen:

- SRM2: Indien het noodzakelijk is om voor een eenvoudige praktijksituatie het luchtkwaliteitseffect van een scherm te bepalen (dwz. een scherm op korte afstand van HWN in buitenstedelijk gebied) kan met een berekening m.b.v. SRM-2 het luchtkwaliteitseffect van een scherm met voldoende betrouwbaarheid worden bepaald. CFD-modelleringen hebben in die situatie (vooralsnog) geen meerwaarde.
- Alternatieve gaussische modellen zoals ADMS of KEMA STACKS+ indien meer complexe wegcombinaties en andere (industriële of agrarische) bronnen van invloed zijn.
- Windtunnelmodellen. De acceptatie van de windtunnelexperimenten (bij bijvoorbeeld bestuurlijke besluitvorming) lijkt op dit moment (nog) groter dan de resultaten van CFD modelleringen. Diverse windtunnels zijn door VROM in het kader van de Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit goedgekeurd als alternatief voor SRM modellen.

Evenwel lijken CFD-modelleringen veel geschikter te zijn voor het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses dan wind tunnelexperimenten. Te denken valt in dit verband aan de gevoeligheid van de uitkomsten voor de gekozen ruwheid, de Traffic produced turbulence (TPT), de taludhoogte, de rijsnelheid, aandeel vrachtverkeer, afstand van het scherm tot de rijbaan, aantal rijbanen. Bij de vertaling van de CFD resultaten naar een jaargemiddeld effect kan gedacht worden aan aantal windsnelheden en windrichtingen. Voorts geven CFD modellen een totaalbeeld van stromingen en concentraties, terwijl bij windtunnels steeds op een beperkt aantal meetplaatsen gemeten kan worden. CFD modelleringen lijken zeer geschikt voor het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses....etc. Het is nu echter nog niet goed mogelijk een afwegingskader te geven wanneer beter gekozen kan worden voor windtunnelexperimenten of voor CFD-modelleringen

Met behulp van CFD kunnen goede resultaten worden bereikt wanneer wordt uitgegaan van een neutrale atmosfeer. De aanname is dat de mechanische turbulentie gegenereerd door de obstakels de atmosferische stabiliteitseffecten domineren. Deze aanname zal vaak terecht zijn dicht bij de obstakels, behalve wellicht bij lage windsnelheden; op grotere afstand gaat de atmosferische turbulentie (of het dempen ervan) weer overheersen. Het in beperkte mate meenemen van de atmosferische stabiliteit in een CFD-model is op dit moment in principe wel mogelijk (maar niet eenvoudig, leidend tot lange rekentijden). Indien in de nabije toekomst een luchtkwaliteitsvoorspelling in relatie tot atmosferische stabiliteit noodzakelijk is, dient RWS zich er van te vergewissen dat in de CFD-modellering hiermee rekening wordt gehouden. NB: in dit kader kan nog vermeld worden dat de stromingen ook kunnen worden voorspeld met LES ('large eddy simulations') een rekentechniek die geen convergentie vereist en wellicht dus sneller tot resultaten kan leiden. Deze modeltechniek in combinatie met fysische obstakels zoals schermen is echter nog een onderwerp voor fundamenteel onderzoek.

CFD modellering voor luchtkwaliteit is een "jong" vakgebied dat sterk in ontwikkeling is. Dit betekent dat in de komende tijd de inzichten omtrent o.a. het toepassingsgebied en de meteorologische variabiliteit, aanmerkelijk kunnen wijzigen. Bij voorkeur worden CFD modelleringen voor praktijksituaties alleen door partijen gedaan die niet alleen aantoonbaar ervaring hebben met dergelijke modelleringen, maar ook blijf geven de ontwikkelingen op de voet te volgen.

Uitgaande van de bovenvermelde toepassingen en kanttekeningen stelt het IPL voor de volgende aanbevelingen te hanteren bij de toepassing van CFD-modellerings:

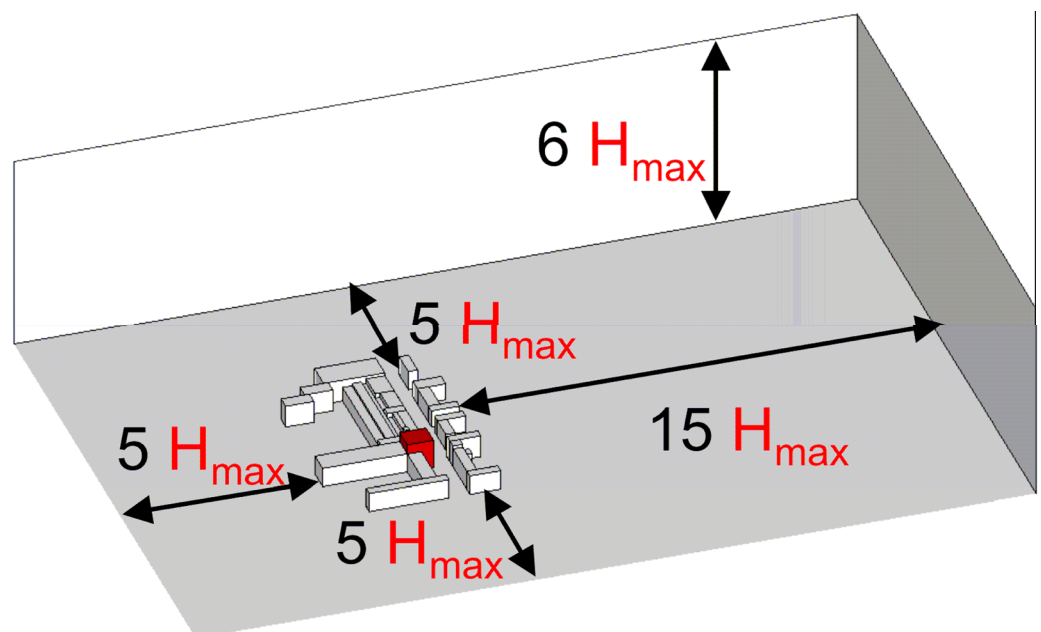
**Atmosferische stabiliteit:** (Praktische) aanbeveling: rekenen voor neutrale condities, maar feitelijk bestaat er een voorkeur voor rekenen met alle atmosferische stabiliteiten. In veel pakketten is dit nog niet echt goed mogelijk; wanneer dit element beter uitgewerkt is in de beschikbare pakketten, is de voorkeur er om voor CFD met meer meteo-condities (instabiele of stabiele condities) te rekenen. Opdrachtnemers kunnen hier dan (onderbouwd) gemotiveerd van afwijken.

**Ruwheidslengte:** De modelleur onderbouwt de keuze voor de waarde van de ruwheidslengte in het ongestoorde gebied. De modelleur maakt duidelijk wat hij heeft gedaan om de ruwheidsfactor goed in te bouwen en door middel van druk- en wind- en turbulentieprofielen en hoe dat heeft uitgepakt.

**Afmetingen rekendomein:** De modelleur toont aan dat de afmetingen ruim genoeg genomen zijn, waarbij vooral de hoogte vanwege het windprofiel aandacht krijgt. Uitgangspunt kan zijn de aanbevelingen van COST Action C14. Opnieuw zijn wind- en drukprofielen zinnig ter illustratie.

**Ongewenste randeffecten:** Werken met een ruime omhullend rekendomein om het eigenlijke interesse gebied voorkomt veel problemen. Verhoudingen zijn relevanter dan absolute dimensies, daarbij speelt ook het element 'rekensnelheid' een rol.

**Regelmatig of onregelmatig grid:** De kwalitatieve aanbeveling is dat de modelleur een onderbouwing moet geven voor het gekozen grid en tonen dat deze keuze adequaat is, dat wil zeggen dat het resultaat onafhankelijk is van het gekozen mesh.



**Rekenpakketkeuze:** Geen aanbeveling op dit punt.

**Stabiliteit aantonen:** De modelleur toont aan dat stabiliteit verkregen is, bijvoorbeeld door het tonen van iteratieplots voor een aantal representatieve monitorpunten.

**Turbulentiemodel:** De aanbeveling is om voorlopig het  $k$ - $\epsilon$ -model of SST te blijven gebruiken. Ook hier geldt dat het onderbouwen van de keuze een onderdeel van de rapportage behoort te zijn.

**Gevoeligheidsanalyse.**

Het aan te bevelen een gevoeligheidsanalyse onderdeel van de berekeningen en de rapportage te laten uit maken. Dit kan bijvoorbeeld betekenen dat de effecten van deelonderwerpen in het model (bijvoorbeeld in het model modulair toevoegen van scherm 1, scherm2, bosjes, talud etc) stapsgewijs worden aangegeven, startend bij een ongestoorde situatie. Ook kan gevraagd worden de gevoeligheid van de gekozen ruwheid, de schermdikte, de TPT door verkeer, de taludhoogte e.d. aan te geven. RWS is dan zelf verantwoordelijk voor het kiezen van de parameters waarop de gevoeligheid toegepast moet worden.

**Verkeersmodel:** Verkeer introduceren als volumebron van voldoende hoogte.

Een en ander is mede gebaseerd op:

- COST Action C14: "Impact of Wind and Storms on City Life and Built Environment, Working group 2 - CFD techniques, RECOMMENDATIONS ON THE USE OF CFD IN PREDICTING PEDESTRIAN WIND ENVIRONMENT"
- COST Action 732: "Quality assurance and improvement of microscale meteorological models", "Best practice guidelines for the CFD simulation of flows in the urban environment"
- VDI Guideline 3783, Part 9, 2005: Environmental Meteorology - Prognostic Microscale Windfield Models - Evaluation for flow around buildings and obstacles.

## DEEL B: Windtunnelonderzoek

## 1 Achtergrond en inleiding

Voor het bepalen van de effecten van maatregelen op de luchtkwaliteit worden in het algemeen luchtverspreidingsmodellerings en windtunnelonderzoeken uitgevoerd. In dit specifieke IPL-project is onderzoek naar de spreiding in de resultaten van windtunnelonderzoek met het accent op het effect van schermen op de luchtkwaliteit.

Er zijn in het verleden door verschillende partijen in Nederland windtunnelonderzoeken uitgevoerd voor de bepaling van het effect van schermen op de luchtkwaliteit. Uit die onderzoeken is gebleken dat de resultaten niet met elkaar overeenkomen of met elkaar vergelijkbaar zijn. De oorzaak van de verschillen in resultaten schuilt mogelijk in het feit dat er geen eenduidige meetmethode voorhanden is voor het bepalen van de effecten van schermen op de luchtkwaliteit bij windtunnelonderzoek. De verschillende methoden die de verschillende windtunnelinstituten toepassen voor luchtkwaliteitonderzoek in het algemeen zijn wel ministerieel goedgekeurd.

In dit kader heeft het IPL het project "Optimalisatie geluidsschermen, begeleiding onderzoek windtunnelonderzoek" ten uitvoer gebracht. Binnen dit kader is het project "Begeleiden van het onderzoek naar windtunnelonderzoek" door KEMA uitgevoerd.

Het project "Onderzoek windtunnelonderzoek" bestaat uit drie onderdelen:

1. Harmonisatie en uitwerken van een eenduidige meetmethode voor windtunnelonderzoek (met het accent op schermeffecten)
2. uitvoeren windtunnelonderzoek naar aanleiding van een vastgestelde testcase
3. vergelijken van de resultaten van de verschillende windtunnelinstituten.

Onderdeel 1 is in de tweede helft van 2007 door KEMA begeleid. In een tweetal workshops is met een aantal Nederlandse, Belgische en Duitse windtunnelexperts een meetprotocol voor windtunnelonderzoek opgesteld.

In onderdeel 2 is aan de hand van dit meetprotocol en nog een aantal additionele randvoorwaarden voor de testcase een vergelijkend windtunnelonderzoek uitgevoerd door drie verschillende Nederlandse windtunneleigenaren. In dit windtunnelonderzoek is de opstelling van de geluidsschermen langs de A28 in de proeftuin nabij Putten (Strand Nulde) nagebootst en doorgemeten. Het windtunnelonderzoek heeft plaatsgevonden in 2008 tot aan het voorjaar 2009. Onderdeel 2 zelf maakte geen deel uit van de opdracht aan KEMA, maar is door het IPL als separate opdracht aan de drie Nederlandse windtunneleigenaren uitgezet.

Onderdeel 3 omvat de vergelijking (benchmark) van de resultaten van de drie windtunnelonderzoeken op basis van de testcase: de nagebootste situatie van de proeftuin in Putten. In dit rapport wordt verslag gedaan van de onderlinge vergelijkingen van de drie windtunnelonderzoeken en van de knelpunten in het meetprotocol. De vergelijking met de resultaten uit de proeftuin volgt buiten het bestek van dit rapport.



## 2 Opzet benchmark

### 2.1 Doel

Het doel van de benchmark is om na te gaan wat de bandbreedte van resultaten is van een in de markt uitgezet windtunnelonderzoek voor luchtkwaliteit rond geluidsschermen aan de hand van een opgesteld meetprotocol en na te gaan waar het meetprotocol nog verbeterd kan worden.

Hiertoe is de opzet van de geluidsschermen in de proeftuin langs de A28 nabij strand Nulde in de periode tussen 2007 en 2009 gesimuleerd in de windtunnels.

### 2.2 Uitgangspunten

Ter voorkoming van een te grote divergentie in de meetresultaten is – zoals reeds in de inleiding is aangegeven – eerst een meetprotocol opgesteld, op basis waarvan de windtunnelmetingen dienden te worden uitgevoerd. Dit meetprotocol is opgesteld in een tweetal workshops samen met de Nederlandse windtunnelexperts en een tweetal buitenlandse windtunnelexperts. Dit meetprotocol is integraal opgenomen in de bijlage.

In het meetproject in de proeftuin is een 4-meter hoog referentiescherm geplaatst en is ook een 7-meter hoog geluidsscherm beproefd. De opstelling met het 4-meter en 7-meter is gebruikt voor het simulatieonderzoek in de windtunnels.

De meetpunten achter de geluidsschermen in de windtunnels zijn (op schaal) precies op de meetlocaties in de proeftuin gelegd (op 5m, 10m, 28,5m en 100m (deze laatste meetlocatie is extra en was in de proeftuin niet aanwezig)). Hiermee wordt een toekomstige vergelijking tussen de proeftuinmetingen en de metingen in de windtunnel vergemakkelijkt.

Naast het meetprotocol zijn aan de windtunnelinstituten de specifieke gegevens van de opstelling van de geluidsschermen in proeftuin verstrekt en ook nadere eisen voor de uitvoering van het windtunnelonderzoek. Deze zijn opgenomen in de bijlage.

### 2.3 Deelnemers

De volgende Nederlandse instituten – met een windtunnel – hebben aan de benchmark deelgenomen:

- TNO (Apeldoorn)
- DNW / CHRI (Noordoostpolder)<sup>1</sup>
- Peutz (Mook)

In deze rapportage zijn de namen van de windtunnelinstituten geanonimiseerd en in willekeurige volgorde gecodeerd als W1, W2 en W3. De onderlinge meetresultaten zijn niet publiek openbaar in verband met de anonimiteit van de gegevens.

<sup>1</sup> De vervolgberekeningen voortvloeiend uit de windtunnelmetingen zijn uitgevoerd door Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs B.V. (CHRI).

## 3 Uitvoering benchmark

### 3.1 **Becommentariëring door de drie instituten**

In het algemeen is het bij ringonderzoeken niet gebruikelijk dat de deelnemers commentaar kunnen leveren op de rapportage van het vergelijkingsonderzoek. Bij dit specifieke onderzoek zijn de uiteindelijke resultaten een resultante van een groot aantal metingen en berekeningen. De drie instituten hebben meer dan gewone aandacht, tijd en extra inspanningen in dit onderzoeksproject gestoken en ook een aantal hindernissen moeten overwinnen om aan de eisen uit het meetprotocol te kunnen voldoen. Met toestemming van IPL is er dan ook voor gekozen om de drie instituten dit benchmark-rapport te laten becommentariëren om een zo goed mogelijke interpretatie en realistische vergelijking van de resultaten te kunnen verwezenlijken.

### 3.2 **Aangeleverde meetgegevens en rapportages**

De drie instituten hebben zowel een rapportage aangeleverd met een beschrijving van de windtunnel, de experimentele opzet en uitgevoerde metingen, als een door KEMA opgesteld MS-Excel-blad invoerformat voor de vergelijking van de relevante meetgegevens.

In het volledige rapport (zie cd in achterkaft) staan beschouwingen over de opzet per windtunnelinstituut. Hierin staat een beschrijving en vergelijking van de volgende onderwerpen:

- Vorm van rapportage
- Toetsing aan eisen uit het meetprotocol
- Vergelijking uitvoering onderdelen meetprotocol
  - Algemene aspecten
  - Schaalmodel
    - Beschrijving schaalmodellen
    - Ruwheid
    - Gemodelleerd groen
  - Windtunnel
    - Windprofiel
    - Turbulentie intensiteiten
  - Tracer gas en homogeniteit
    - Type tracer gas
    - Tracer gas injectie en homogeniteit
    - Maatregelen ter voorkoming van tracergas accumulatie
    - Monsternamedebiet
    - Bronsterkte onafhankelijkheid
  - Test condities
    - Uitgevoerde metingen
    - Reynolds onafhankelijkheid
    - Referentiesnelheid
    - Voertuig geïnduceerde turbulentie
    - Stabiliteit van de windsnelheid gedurende de tests
  - Meetapparatuur
    - Windsnelheids en turbulentieprofielen

- Tracergas analyse
- Meetfrequentie en meetduur
- Data verwerking
- Invloed van wegen buiten de draaischijf
- Berekening van het schermeffect

## 4 Vergelijking meetresultaten

### 4.1 Concentratiecoëfficiënten

In eerste instantie bleek dat de numerieke waarden van de concentratiecoëfficiënten tussen de windtunnelinstituten niet direct vergelijkbaar waren. In een nader onderling overleg met de windtunnelinstituten is afgesproken om dezelfde uitgangspunten voor de berekening van de concentratiecoëfficiënten te hanteren, waarna de instituten herberekende waarden voor de concentratiecoëfficiënten hebben aangeleverd. Desondanks bleken de numerieke waarden voor de concentratiecoëfficiënten toch nog te veel te verschillen. Na een tweede overleg tussen de windtunnelinstituten zijn opnieuw de definitie en uitgangspunten voor de concentratiecoëfficiënten onder de loep genomen. Daarna zijn de concentratiecoëfficiënten opnieuw berekend en deze blijken nu goed met elkaar overeen te stemmen. In de bijlage zijn de nu gehanteerde definitie en uitgangspunten opgenomen. Met deze laatst herberekende en gerapporteerde concentratiecoëfficiënten zijn nadere statistische berekeningen uitgevoerd. Dit wordt in de volgende paragrafen nader uitgewerkt.

#### 4.1.1 *Vergelijking spreiding in concentratiecoëfficiënten*

Voor de resultaten van elk windtunnelinstituut is per meetpunt de concentratiecoëfficiënt gemiddeld over de drie windtunnelsnelheden en de standaarddeviatie berekend. Dit is in de bijlage weergegeven.

Om de resultaten tussen de windtunnelinstituten vergelijkbaar te houden, is er voor gekozen om de waarden op de windhoeken van 30° en 150° bij de 100m afstand niet in de *statistische* berekeningen mee te nemen. Door ondermeer het aantal vrijheidsgraden in het meetprotocol, de schaalgrootte, asymmetrie enzovoort, zijn deze waarden onderling slecht vergelijkbaar. De waarden die niet zijn meegenomen zijn in de tabellen rood gemarkeerd.

Omdat de absolute waarden van de standaarddeviaties niet constant zijn als functie van de waarde van de concentratiecoëfficiënt (of wel deze zijn niet homoscedastisch, met name op 100m afstand) is ervoor gekozen om de standaarddeviatie relatief te maken ten opzichte van de gemiddelde concentratiecoëfficiënt.

Deze relatieve standaarddeviaties (variatiëcoëfficiënten) geven de spreiding weer **binnen** de resultaten van een windtunnelinstituut of wel hoe goed reproduceert een windtunnelinstituut haar resultaten. Vervolgens zijn per situatie (ongestoord, achter het 4m scherm en achter het 7m scherm de standaarddeviaties statistisch gemiddeld (gepooled). Vervolgens is ook de overall standaarddeviatie over alle metingen berekend.

In navolgende tabel zijn de relatieve standaarddeviaties per windtunnelinstituut weergegeven.

Standaardafwijkingen in de concentratiecoëfficiënten per windtunnelinstituut				
	Ongestoord	Achter 4m scherm	Achter 7m scherm	Overall
W1	4,2%	4,8%	4,4%	4,5%
W2	6,5% (6,7%) <sup>1)</sup>	8,3% (5,4%) <sup>1)</sup>	6,8% (4,8%) <sup>1)</sup>	7,2% (5,7%) <sup>1)</sup>
W3	6,8%	6,2%	6,9%	6,6%

<sup>1)</sup> De waarden tussen haakjes zijn exclusief de serie metingen met de laagste windsnelheid, waarvan bij W2 bekend is dat er enige windsnelheid afhankelijkheid (zie verdere uitleg in de tekst).

Uit de tabel blijkt dat per instituut de spreidingen per situatie (ongestoord, achter 4m en achter 7m scherm) dicht bij elkaar liggen en statistisch ook niet verschillen. Ofwel de **binnen-instituut** spreiding kan constant worden verondersteld over de verschillende situaties. Daardoor is het mogelijk een "overall" standaardafwijking te berekenen per instituut. Dit is in de laatste kolom weergegeven.

W2 heeft als laagste windtunnelsnelheid weloverwogen een snelheid gekozen, waarvan bekend was dat er enige Reynoldsafhankelijkheid bij zou optreden. Hierdoor kon aangetoond worden dat windtunnelmetingen moeten plaatsvinden bij de door W2 standaard toegepaste windsnelheid of hoger. De waarden tussen haakjes voor W2 geven de spreiding weer zonder de meetresultaten bij deze lage windsnelheid te betrekken.

De overall spreiding in de metingen **tussen** de instituten blijkt statistisch wel te verschillen. De spreiding in de resultaten van W1 is statistisch significant lager dan van W2 en W3. De spreiding in resultaten tussen W2 en W3 zijn statistisch niet verschillend.

#### 4.1.2

##### *Vergelijking concentratiecoëfficiënten*

Omdat de concentratiecoëfficiënt een dimensieloze grootheid is, is het ook mogelijk de concentratiecoëfficiënten van de windtunnel instituten zelf te vergelijken. Hierbij zijn de gemiddelde concentratiecoëfficiënten over de drie windsnelheden per windtunnelinstituut met elkaar vergeleken.

Per windtunnel instituut is dus een set data verkregen met gemiddelde concentratiecoëfficiënten. Uit deze drie sets kan dan ook weer de standaarddeviatie worden berekend. Dit geeft de spreiding weer in concentratiecoëfficiënten als dit door een willekeurig instituut wordt bepaald. Dit is samengevat in onderstaande tabel en in meer detail in bijlage 3 blad 5 weergegeven.

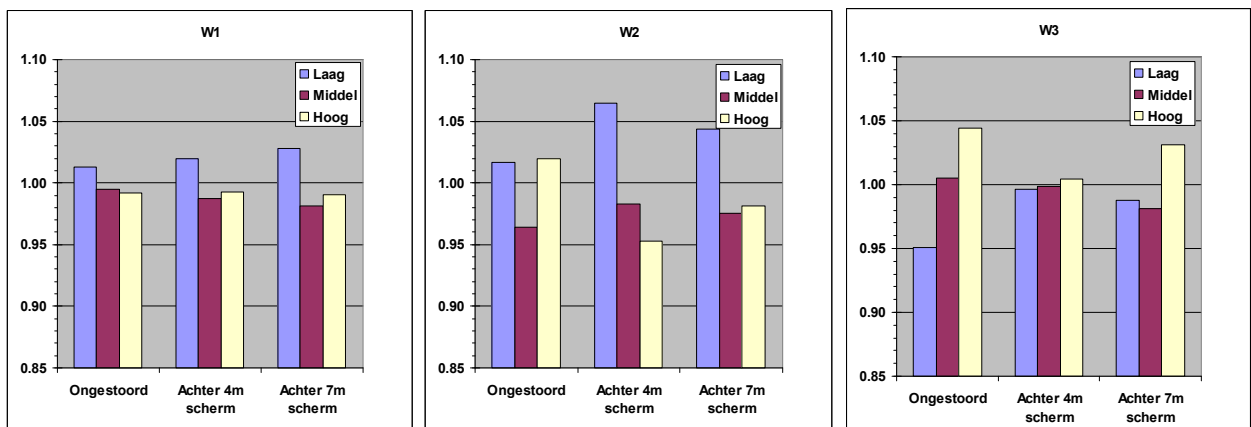
Standaardafwijkingen in de concentratiecoëfficiënten <b>tussen</b> de windtunnelinstituten				
Ongestoord	Achter 4m scherm	Achter 7m scherm	Overall	
14,5%	16,0%	21,8%	17,7%	

Uit de tabel lijkt een stijgende tendens in de spreidingen tussen de windtunnelinstituten op te treden. De spreidingen tussen "ongestoord" en "achter het 7m scherm" liggen op de grens van significantie. Desondanks is een "overall" standaarddeviatie berekend van 17,7%. Dit geeft aan dat een willekeurig windtunnelinstituut binnen deze benchmark een concentratiecoëfficiënt vaststelt met een absolute betrouwbaarheid van 35% (95% betrouwbaarheidsinterval).

#### 4.1.3 Windsnelheidsafhankelijkheidstest

Om de (on)-afhankelijkheid als functie van de windsnelheid inzichtelijk te maken, zijn de concentratiecoëfficiënten per windsnelheid genormeerd op basis van de gemiddelde concentratiecoëfficiënt. Hierdoor worden de verschillen in grootte van concentratiecoëfficiënten op de verschillende afstanden genormeerd. In bijlage 3 bladen 2,3 en 4 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven.

In navolgende figuren zijn de resultaten grafisch weergegeven



Uit de grafieken valt voor W1 geen windsnelheidsafhankelijkheid te constateren. Bij W2 lijkt voor de situatie achter het 4m scherm enige windsnelheidsafhankelijkheid op te treden. Dit is statistisch ook aantoonbaar. Dit is logisch gezien het feit dat bij W2 bekend is dat bij de laagste windsnelheid enige windsnelheid afhankelijkheid optreedt. W2 voert normaliter metingen uit bij een hogere windsnelheid. Bij W3 lijkt in de ongestoorde situatie enige windsnelheid afhankelijkheid te bestaan (ook dit is statistisch aantoonbaar).

#### 4.2 Bronsterkte onafhankelijkheid

Er is twee keer een bronsterkte onafhankelijkheids test uitgevoerd. Eén tijdens de reguliere meting en één in de herhalingsmeting, nadat het schaalmodel uit de tunnel was uitgebouwd en weer ingebouwd.

Door de meetresultaten bij de andere bronsterkte te delen door de meetresultaten bij de oorspronkelijke bronsterkte wordt een quotiënt verkregen dat bij volledige bronsterkte onafhankelijkheid de waarde van 1,00 moet hebben.

In navolgende tabel staan de berekeningsresultaten hiervan weergegeven.

Bronsterkte onafhankelijkheidstest			
Quotiënten berekening over alle meetpunten			
Instituut	Gemiddelde	Standaard-afwijking	Significant afwijkend ?
W1	0,98	0,044	Nee
W2	0,98	0,045	Nee
W3	1,03	0,057	Nee
Herhalingsmetingen			
Instituut	Gemiddelde	Standaard-afwijking	Significant afwijkend ?
W1	0,99	0,047	Nee
W2	1,00	0,044	Nee
W3	Geen opgave	Geen opgave	Geen opgave

Uit de tabel blijkt duidelijk dat voldaan is aan het criterium voor de onafhankelijkheid van de bronsterkte.

### 4.3 Schermeffecten

In de bijlage zijn de resultaten van de berekende schermeffecten door drie windtunnelinstituten per windhoek weergegeven. De schermeffecten zijn *zonder* voertuig geïnduceerde turbulentie berekend. In onderlinge afstemming en voor vergelijkbaarheid is afgesproken de schermeffecten bij windhoeken van 30° en 150° op de afstand van 100m niet in de berekeningen te betrekken. Door ondermeer het aantal vrijheidsgraden in het meetprotocol, de schaalgrootte, asymmetrie enzovoort, zijn de waarden op deze punten onderling slecht of niet vergelijkbaar.

De schermeffecten zijn berekend voor de volgende situaties:

- op basis van de concentratiecoëfficiënten
- voor PM<sub>10</sub>
- voor NO<sub>2</sub>

Voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub> zijn de schermeffecten berekend op basis van een overeengekomen **vaste** windsnelheid in het vrije veld van 5 m/s op 10 m hoogte bij een ruwheidslengte van 0,03m en **inclusief** voertuiggeïnduceerde turbulentie.

#### 4.3.1 Op basis van concentratiecoëfficiënten

De windtunnelinstituten hebben de schermeffecten op basis van de concentratiecoëfficiënten op verschillende manieren gerapporteerd (zie in de bijlage).

Instituut W1 heeft voor berekening van de schermeffecten zijn de gegevens bij windsnelheid 5,7m/s gebruikt voor het 4m en 7m scherm en de gegevens bij 7,6 m/s voor de ongestoorde situatie.

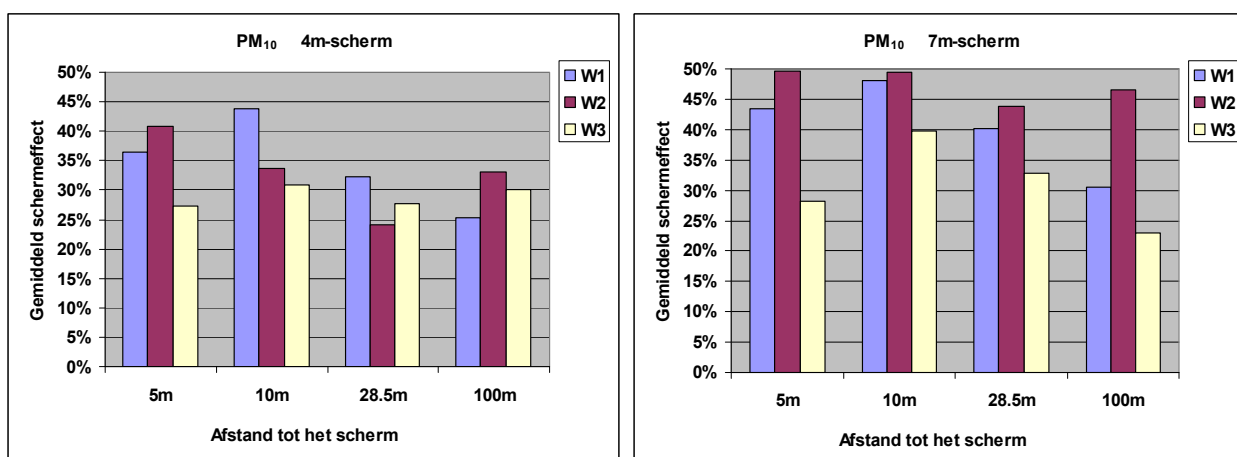
Instituut W2 heeft alleen voor de windsnelheid van 3,1 m/s de schermeffecten berekend. W3 heeft het gemiddelde van de schermeffecten over alle drie de windsnelheden gerapporteerd.

Alle resultaten zijn berekend **zonder** voertuig geïnduceerde turbulentie.

Gemiddeld schermeffect (concentratiecoëfficiënten) over alle hoeken									
Instituut	Achter 4m scherm				Achter 7m scherm				
	5m	10m	28.5m	100m	5m	10m	28.5m	100m	
W1	45%	52%	37%	27%	52%	57%	46%	33%	
W2	41%	34%	24%	33%	49%	49%	43%	46%	
W3	34%	36%	30%	26%	35%	44%	33%	16%	
Gemiddelde	40%	41%	30%	29%	45%	50%	40%	31%	
SD <sup>1)</sup>	5%	10%	7%	4%	9%	6%	7%	15%	

<sup>1)</sup> De standaarddeviatie is uitgedrukt in "absolute" procenten schermeffect

In navolgende figuur zijn de resultaten voor de schermeffecten op basis van de concentratiecoëfficiënten grafisch weergegeven.



#### 4.3.2 Schermeffect PM<sub>10</sub>

In navolgende tabel zijn de resultaten gemiddeld over alle windhoeken weergegeven.

Het schermeffect voor PM<sub>10</sub> is berekend op basis van een overeengekomen **vaste** windsnelheid in het vrije veld van 5 m/s op 10 m hoogte bij een ruwheidslengte van 0,03m en **inclusief** voertuiggeïnduceerde turbulentie

Gemiddeld schermeffect PM <sub>10</sub> over alle hoeken bij 5m/s									
Instituut	Achter 4m scherm				Achter 7m scherm				
	5m	10m	28.5m	100m	5m	10m	28.5m	100m	
W1	36%	44%	32%	25%	43%	48%	40%	31%	
W2	41%	34%	24%	33%	50%	49%	44%	47%	
W3	27%	31%	28%	30%	28%	40%	33%	23%	
Gemiddelde	35%	36%	28%	29%	40%	46%	39%	33%	
SD <sup>1)</sup>	7%	7%	4%	4%	11%	5%	6%	12%	

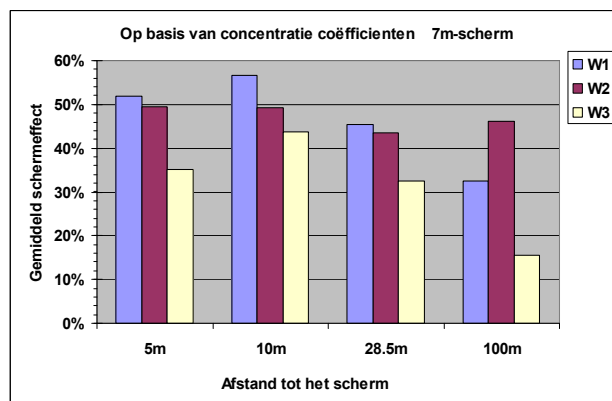
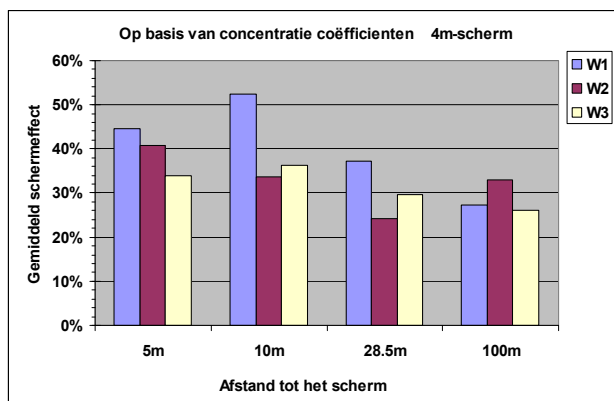
<sup>1)</sup> De standaarddeviatie is uitgedrukt in "absolute" procenten schermeffect



In de volgende figuren zijn de gemiddelde schermeffecten voor PM<sub>10</sub> grafisch weergegeven.

#### 4.3.3 Schermeffect NO<sub>2</sub>

In navolgende tabel zijn de resultaten gemiddeld over alle windhoeken weergegeven.

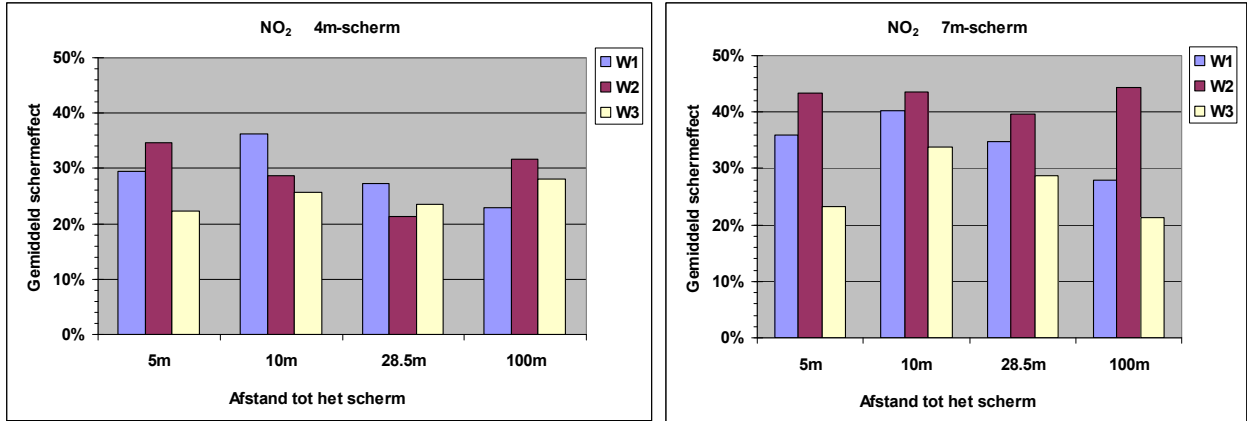


Het schermeffect voor NO<sub>2</sub> is berekend op basis van een overeengekomen **vaste** windsnelheid in het vrije veld van 5 m/s op 10 m hoogte bij een ruwheidslengte van 0,03m en **inclusief** voertuiggeïnduceerde turbulentie.

Gemiddeld schermeffect NO <sub>2</sub> over alle hoeken bij 5 m/s									
Instituut	Achter 4m scherm				Achter 7m scherm				
	5m	10m	28.5m	100m	5m	10m	28.5m	100m	
W1	29%	36%	27%	23%	36%	40%	35%	28%	
W2	35%	29%	21%	32%	43%	44%	40%	44%	
W3	20%	23%	21%	26%	23%	34%	29%	21%	
Gemiddelde	29%	30%	24%	27%	34%	39%	34%	31%	
SD <sup>1)</sup>	6%	5%	3%	4%	10%	5%	5%	12%	

<sup>1)</sup> De standaarddeviatie is uitgedrukt in "absolute" procenten schermeffect

In de volgende figuren zijn de gemiddelde schermeffecten voor NO<sub>2</sub> grafisch weergegeven.



#### 4.3.4

#### Spreiding schermeffecten tussen instituten

Uit de voorgaande paragrafen is de spreiding in de bepaling van de schermeffecten **tussen** windtunnelinstituten vastgesteld.

In de navolgende tabel zijn de resultaten uit de vorige paragrafen samengevat.

	<b>Gemiddeld percentage schermeffect (met standaarddeviatie tussen de instituten) in deze benchmark</b>			
	Achter 4m scherm op:			
	5m	10m	28.5m	100m
"Concentratie coëfficiënten"	40 ± 5%	41 ± 10%	30 ± 7%	29 ± 4%
PM <sub>10</sub>	35 ± 7%	36 ± 7%	28 ± 4%	29 ± 4%
NO <sub>2</sub>	29 ± 6%	30 ± 5%	24 ± 3%	27 ± 4%
	Achter 7m scherm op:			
	5m	10m	28.5m	100m
"Concentratie coëfficiënten"	45 ± 9%	50 ± 6%	40 ± 7%	31 ± 15%
PM <sub>10</sub>	40 ± 11%	46 ± 5%	39 ± 6%	33 ± 12%
NO <sub>2</sub>	34 ± 10%	39 ± 5%	34 ± 5%	31 ± 12%

Uit de resultaten blijkt dat de spreiding (standaarddeviatie) in de vaststelling van een schermeffect door een willekeurig windtunnelinstituut ligt tussen 5% en 15% schermeffect. Gemiddeld genomen ligt de spreiding op 7%. Dat wil zeggen dat een vastgesteld schermeffect door een windtunnelinstituut een onzekerheid (95% betrouwbaarheidsinterval) heeft van circa 15% schermeffect. Ofwel het vastgestelde schermeffect bedraagt x% ± 15%.

#### 4.4 Herhalingsmetingen

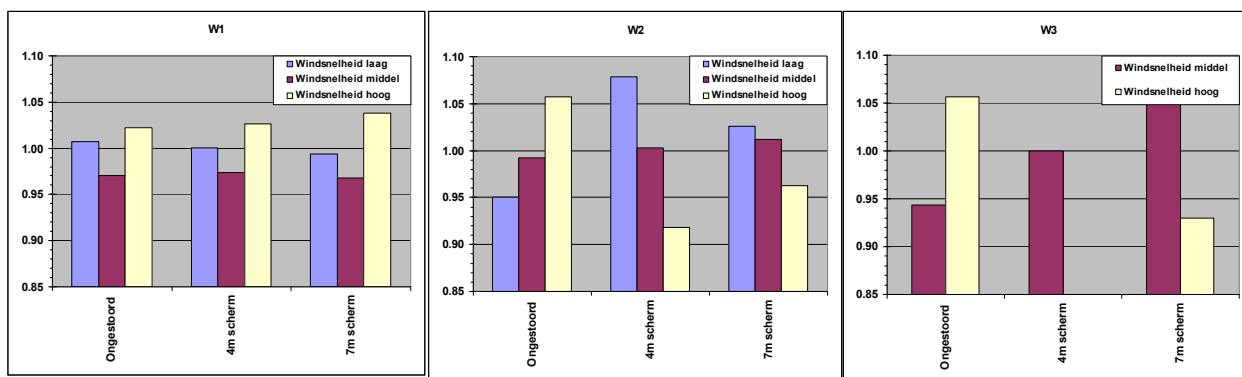
Eén van de eisen in deze benchmark was, dat het schaalmodel volledig werd uitgebouwd en pas na een bepaalde periode weer werd ingebouwd. Met deze methodiek kan een indruk verkregen worden van de herhaalbaarheid van de metingen.

De herhalingsmetingen omvatten het volgende:

- meting windprofiel en turbulentie profiel
- bronsterkte onafhankelijkheidstest
- windsnelheidsafhankelijkheidstest (bij een lagere en een hogere snelheid)
- bepaling van concentratiecoëfficiënten

In de volledige rapportage (zie cd in achterkaft) staan deze verder uitgewerkt

De gemiddelde quotiënten over de afstanden zijn per windtunnelinstituut hieronder grafisch weergegeven.



Uit de figuren blijkt dat er geen windsnelheidsafhankelijkheid op te treden, aangezien dan voor alle drie situaties (ongestoord, 4m en 7m scherm) een zelfde trend zou moeten optreden (zie de opmerkingen bij paragraaf 6.1.1 en 6.1.3 ten aanzien van W2).

##### 4.4.1 Concentratiecoëfficiënten

Instituut W3 heeft geen complete set van herhalingsmetingen kunnen uitvoeren (maar alleen de windtunnelsnelheidsafhankelijkheid). Hierdoor is alleen een vergelijking tussen instituut W1 en W2 mogelijk.

In de bijlage zijn de resultaten van de herhalingsmetingen en ook de oorspronkelijke metingen die eerder zijn uitgevoerd, vermeld. Door de herhalingsmetingen te vergelijken met de oorspronkelijke metingen kan de herhaalbaarheid van de metingen worden vastgesteld.

Hiertoe zijn per afstand en per windrichting het quotiënt tussen oorspronkelijke meting en herhalingsmeting berekend. Vervolgens is per situatie (ongestoord, 4m scherm of 7m scherm) de standaardafwijking berekend. Tevens is de overall standaardafwijking van de quotiënten over alle meetpunten berekend.

In navolgende tabel staan de statistische resultaten samengevat.

Instituut	Gemiddelde quotiënt over alle meetpunten	Standaardafwijking van het quotiënt per meetpunt
W1	1,01	7,4%
W2	0,98	6,0%

De spreiding per individueel meetpunt ligt tussen 6,0% en 7,4% bij de twee windtunnelinstituten. Ofwel de herhaalbaarheid van een individueel windtunnelresultaat ligt in de orde van 12 tot 15% (95% betrouwbaarheidsinterval).

## 5 Evaluatie benchmark en conclusies

In dit hoofdstuk worden de uitvoering en de resultaten van de benchmark geëvalueerd.

### 5.1 Uitvoering benchmark

#### 5.1.1 *Doorlooptijd*

De doorlooptijd van de benchmark was met een periode van ruim 1,5 jaar aanzienlijk langer dan oorspronkelijk voorzien. Een van de oorzaken hiervan was meer tijd die benodigd was om extra voorzieningen aan te brengen en metingen die uitgevoerd moesten worden, om aan de benchmark te kunnen deelnemen. De benchmark diende ook ingepland te worden tussen de normale operationele bezetting van windtunnelmetingen. Daarnaast heeft proces voor de onderlinge afstemming van de definities en uitwerking voor het presenteren van vergelijkbare meetresultaten door de windtunnelinstituten de nodige tijd gevergd. Hierbij is door zowel KEMA als de windtunnelinstituten veel tijd besteed aan het vergelijken en de herberekenen van de meetresultaten. Het ging hierbij uitsluitend om de basis waarop en hoe de meetresultaten dienden te worden uitgedrukt en uiteraard niet om aanpassing van de oorspronkelijke meetresultaten (hetgeen ongewenst en niet toelaatbaar is).

#### 5.1.2 *Meetprotocol en uitvoering windtunnelonderzoeken*

Tijdens de uitvoering en in de commentaar ronde bleek dat een aantal onderdelen en definities in het meetprotocol onduidelijk of niet eenduidig waren of dat er té hoge en niet realistische eisen zijn gesteld, waardoor de onderzoekstijd onnodig langer werd.

Punten die ondermeer onduidelijk zijn, is de correcte definitie van de referentiewindsnelheid en de definitie van de concentratiecoëfficiënten (over dit laatste is nu overeenstemming bereikt, echter dit dient nog wel in het meetprotocol te worden aangepast). Eisen ten aanzien van de minimum eis aan de schaalgrootte bleek achteraf een groot punt van discussie. Alleen W2 heeft zich strikt aan de eis van de minimale hoogte van het scherm in het protocol gehouden. Dit resulteerde in een schaalfactor, welke W2 normaliter nooit toepast en dit kan een oorzaak zijn in de verschillen tussen de instituten. De eisen aan de spreiding in de onzekerheid van de meting met de analyse apparatuur blijkt te streng te zijn, waardoor de bemonsteringsduur onevenredig lang wordt.

Er wordt aanbevolen om het meetprotocol met de windtunnelinstituten nader te evalueren en aan te passen aan de ervaringen die er in deze benchmark mee zijn opgedaan.

#### 5.1.3 *Aanlevering rapportage en meetgegevens*

Zowel het tijdstip als de wijze van aanlevering van de rapportages en meetgegevens verschilde per windtunnelinstituut. De maximale tijdsperiode tussen de aanlevering van de rapportages bedroeg een half jaar.

De rapportage van één windtunnelinstituut bestond uit een zeer beknopt document gevolgd, met een DVD met Excel-bladen van alle uitgevoerde metingen en een aantal PDF-documenten met nader informatie. Dit komt het overzicht van uitgevoerde onderzoek niet ten goede. De vooraf aangeleverde EXCEL-bladen, waarop de meetgegevens dienden te worden ingevuld, bleken niet altijd volledig te zijn ingevuld. Eén windtunnelinstituut heeft meerdere correcties op de rapportages aangeleverd.

Na het eerste concept van de benchmark resultaten bleek dat bepaalde definities door de verschillende windtunnelinstituten verschillend werden geïnterpreteerd, waardoor de meetresultaten niet direct met elkaar vergelijkbaar waren. Hierdoor hebben alle windtunnelinstituten meerdere malen herberekende meetresultaten moeten aanleveren.

## **5.2 Vergelijking meetresultaten**

### *5.2.1 Spreiding in de concentratiecoëfficiënten*

De standaardafwijking in een willekeurige concentratiecoëfficiënt blijkt over alle drie windtunnelinstituten tussen de 4,5% en 7,2% te liggen over alle windsnelheden en alle gemeten situaties (ongestoord, 4m of 7m scherm). Dit is de spreiding in de meetresultaten **binnen** een instituut. Dit betekent dat de onzekerheid (95%-betrouwbaarheidsinterval) in de vaststelling van een concentratiecoëfficiënt door een willekeurig windtunnelinstituut in deze benchmark tussen de 9% en 14,5% ligt. Dit houdt tevens in dat in de vervolgberekeningen die met die concentratiecoëfficiënten worden uitgevoerd, minimaal deze onzekerheid begrepen zit.

Bij een tweetal instituten bleek dat er correcties nodig waren om de fluctuaties in de dosering van het tracergas te corrigeren. Op dit punt dient in het meetprotocol dan ook nadere aandacht geschonken te worden.

Uit de vergelijking van de concentratiecoëfficiënten **tussen** de windtunnelinstituten blijkt dat de spreiding gemiddeld 17,7% bedraagt. Ofwel een willekeurig windtunnelinstituut binnen deze benchmark stelde een concentratiecoëfficiënt vast met een absolute betrouwbaarheid van 35% (95% betrouwbaarheidsinterval).

### *5.2.2 Herhaalbaarheid van de resultaten*

Uit de metingen waarbij het model uit de windtunnel werd gebouwd en opnieuw weer werd ingebouwd, blijkt dat de standaardafwijking in de bepaling van de concentratiecoëfficiënten tussen 6,0% en 7,4% ligt (bepaald op basis van slechts twee windtunnelinstituten) en bij slechts één windsnelheid. Dit is in goede overeenstemming met de eerder vastgestelde bandbreedte.

### *5.2.3 Onafhankelijkheid van windsnelheid en bronsterkte*

Bij alle drie windtunnelinstituten blijken de resultaten vrijwel onafhankelijk te zijn van windsnelheid en bronsterkte. Op basis hiervan zou een verlichting in het meetprotocol en/of opdracht verstrekking kunnen worden aangebracht, waarbij slechts een eenmalige controle op windsnelheidsafhankelijkheid en bronsterkte wordt uitgevoerd.

#### 5.2.4 Bepaling schermeffecten

De bepaling van de schermeffecten is uitgevoerd voor de volgende situaties:

- op basis van de concentratiecoëfficiënten
- voor PM<sub>10</sub>
- voor NO<sub>2</sub>

Voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub> zijn de schermeffecten berekend op basis van een overeengekomen **vaste** windsnelheid in het vrije veld van 5 m/s op 10 m hoogte bij een ruwheidslengte van 0,03m en **inclusief** voertuiggeïnduceerde turbulentie.

In de navolgende tabel zijn de resultaten uit de vorige paragrafen samengevat.

	<b>Gemiddeld percentage schermeffect (met standaarddeviatie tussen de instituten) in deze benchmark</b>			
	Achter 4m scherm op:			
	5m	10m	28.5m	100m
"Concentratie-coëfficiënten"	40 ± 5%	41 ± 10%	30 ± 7%	29 ± 4%
PM <sub>10</sub>	35 ± 7%	36 ± 7%	28 ± 4%	29 ± 4%
NO <sub>2</sub>	29 ± 6%	30 ± 5%	24 ± 3%	27 ± 4%
Achter 7m scherm op:				
	5m	10m	28.5m	100m
"Concentratie-coëfficiënten"	45 ± 9%	50 ± 6%	40 ± 7%	31 ± 15%
PM <sub>10</sub>	40 ± 11%	46 ± 5%	39 ± 6%	33 ± 12%
NO <sub>2</sub>	34 ± 10%	39 ± 5%	34 ± 5%	31 ± 12%

### 5.3 Conclusies

Het opzetten, uitvoeren en evalueren van deze benchmark windtunnelonderzoek blijkt langduriger te zijn geweest dan aanvankelijk was voorzien. De oorzaak hiervan was ondermeer dat de windtunnelinstituten veel tijd en inspanningen hebben moeten verrichten om volgens het meetprotocol te kunnen werken en de metingen binnen het reguliere werk te kunnen inpassen. Daarnaast is er veel tijd nodig geweest om eenduidige definities te maken om de meetresultaten op één en dezelfde basis te kunnen vergelijken.

Het opgestelde meetprotocol blijkt een goed instrument te zijn om de bandbreedte van metingen te verkleinen en het aantal vrijheidsgraden in het windtunnelonderzoek te beperken. Uit deze benchmark is ook naar voren gekomen dat het meetprotocol het eindstadium nog niet heeft bereikt. Op een aantal punten blijkt het meetprotocol niet eenduidig te zijn in definities en niet voldoende duidelijk. Daarnaast blijken een aantal eisen té streng en/of onnodig te zijn, waardoor er te veel extra werk besteed moet worden, zonder dat dit de kwaliteit van de metingen verbetert.

Indien het meetprotocol in toekomstige onderzoeken als leidraad gebruikt gaat worden is het zeer sterk aan te bevelen om met de drie windtunnelinstituten het

meetprotocol nog eens kritisch alle onderdelen onder de loep te nemen, met de ervaring die is opgedaan en de knelpunten die zijn geconstateerd, om tot een eenduidig en goed bruikbaar instrument te komen.

De spreiding (uitgedrukt als standaarddeviatie) in de bepaling van de concentratiecoëfficiënten door een willekeurig windtunnelinstituut blijkt in de bandbreedte van circa 4,5% tot 7,5% te liggen (de zogenaamde **binnen**-instituut spreiding). Ook herhalingsmetingen blijken binnen deze bandbreedte te vallen.

De spreiding (uitgedrukt als standaarddeviatie) in de vaststelling van een concentratiecoëfficiënt **tussen** de windtunnelinstituten onderling blijkt circa 18% te bedragen.

De schermeffecten zijn bepaald op basis van de concentratiecoëfficiënten (**zonder** voertuig geïnduceerde turbulentie) uit de windtunnelmetingen, de berekende schermeffecten (**met** voertuig geïnduceerde turbulentie en bij een **vaste** windsnelheid van 5 m/s op 10m hoogte) voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub>.

De bepaling van de schermeffecten is een combinatie van metingen in de windtunnel en berekeningen met luchtkwaliteitmodellen. De onzekerheid in het schermeffect voor zowel NO<sub>2</sub> als PM<sub>10</sub> ligt voor een willekeurig windtunnelinstituut op circa 7% (standaarddeviatie uitgedrukt als "absoluut" schermeffect)

Het gemiddelde scherm effect zoals bepaald in deze benchmark door drie windtunnelinstituten blijkt achter het 4m scherm voor PM<sub>10</sub> te liggen tussen 29% en 36% en voor NO<sub>2</sub> tussen 24% en 30%. Achter het 7m scherm ligt dit voor PM<sub>10</sub> tussen 33% tot 46% en voor NO<sub>2</sub> tussen 31% en 39%.

De resultaten uit deze benchmark kunnen niet zonder meer worden geprojecteerd op windtunnel studies in het algemeen. Er dient rekening dient gehouden te worden met het feit dat de gemodelleerde situatie van de proeftuin bij strand Nulde anders is dan in een stedelijke omgeving. Voor een vervolgtraject wordt aanbevolen om na te gaan wat de deelbijdragen in de nu vastgestelde spreidingen zijn en of het mogelijk is om deze te verkleinen.



## Deel C: Meten aan luchtkwaliteit in praktijksituatie

# 1 Inleiding

## 1.1 Innovatieprogramma Luchtkwaliteit

In het kader van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit zijn veel verschillende onderzoeken uitgevoerd waarbij praktijkmetingen gedaan zijn. Bij deze onderzoeken zijn heel diverse methoden en meetapparatuur gebruikt. In de projecten is een schat aan ervaring opgedaan, waarvan het heel nuttig is dat die voor andere projecten en programma's ter beschikking komt. Bij de uitvoering en begeleiding van de projecten zijn veel partijen betrokken geweest, o.a. TNO en M+P raadgevende ingenieurs bv. Dit deel van het rapport is samengesteld door de genoemde partijen, die uiteraard gebruik hebben gemaakt van de rapportages die vanuit de projecten verschenen zijn. In dit rapport wordt thematisch de belangrijkste "geleerde lessen" beschreven.

## 1.2 Projecten

In de hier beschreven onderzoeken wordt steeds onderzocht in hoeverre een bepaalde maatregel leidt tot verbetering van de luchtkwaliteit op een bepaalde plaats. Wat dan het *effect* genoemd wordt is meestal de verlaging van de bijdrage van het verkeer aan de concentratie van een stof als gevolg van de maatregel. Doorgaans wordt het effect uitgedrukt in procenten. Een effect van 10 % betekent daarmee dat een concentratiebijdrage van bijvoorbeeld  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wordt verlaagd tot  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In dit rapport worden niet alle IPL meetonderzoeken beschouwd. Er is een selectie gemaakt van de meest relevante.

In de onderstaande paragrafen zijn de verschillende meetprojecten kort samengevat.

naam	Doel	Stoffen	lengte meetperiode	Uitvoering
Proeftuin Schermen	effect van (geoptimaliseerde) schermen	fijn stof / NOx	5 x 3 maanden	M+P
Thomassentunnel	effect van elektrische lading in tunnels	fijn stof	4 maanden	TNO / M+P
Vegetatie Vaassen	effect van vegetatie	fijn stof / NOx	6 weken in de zomer, 2 weken in de winter	ECN / TNO
Vegetatie Valburg	effect van vegetatie	fijn stof / NOx	9 maanden	WUR / M+P
A73 Nijmegen	effect CaCl <sub>2</sub> en wegdektype	fijn stof	7 maanden	M+P
Dynamax	effect dynamische snelheid	fijn stof / NOx	9 maanden	TNO / M+P

### 1.2.1 Proeftuin Schermen

Het IPL heeft de Proeftuin Schermen in 2007 ingericht. Aan de westzijde van de A28 ter hoogte van Putten zijn door M+P vier meetdoorsneden gerealiseerd. Op twee doorsneden zijn in vijf meetsessies van elk drie maanden steeds andere schermen beproefd. Op één doorsnede heeft gedurende alle meetsessies een standaard vier meter hoog scherm gestaan dat in het onderzoek als referentie dienst deed. Op de laatste meetdoornede, de nullijn, is geen scherm geplaatst. Elke meetdoornede heeft drie meetpunten. Daarnaast is aan de oostkant van de weg een achtergrondpunt ingericht. De verschillen tussen de gemeten concentraties achter de schermen en de concentraties op de nul-lijn zijn gerelateerd aan de aanwezigheid van het scherm en

vertaald naar een "schermeffect" op de verkeersgerelateerde emissies aan luchtverontreiniging. In de proeftuin zijn in totaal dertien meetpunten ingericht. Aan een tweetal schermen heeft TNO aanvullende metingen uitgevoerd.

#### 1.2.2 *Thomassentunnel*

De BAM en TU Delft hebben gezamenlijk een fijn stof reductiesysteem in tunnels ontworpen aangeduid als het elektrostatisch concept. Door een elektrisch veld op te wekken worden fijn stof deeltjes geladen. Als de geladen deeltjes door turbulente luchtbewegingen in de buurt komen van geaarde metalen oppervlak worden ze afgevangen.

In het kader van het IPL is de werkzaamheid van het elektrostatisch concept in een praktijksituatie in de Thomassentunnel (A15, Rijnmond) beproefd. Het doel van het onderzoek was om de invloed van het systeem op de concentratie van PM<sub>10</sub> en PM<sub>2.5</sub> in en buiten de tunnelmond vast te stellen. Primair was de doelstelling afgebakend op de Thomassentunnel in de zomer van 2009. Een secundaire doelstelling was om begrip te krijgen van de omstandigheden die een rol spelen met als resultaat een generalisering van het effect.

Het effect wordt afgeleid uit metingen van de concentratieverloop in de tunnel, waarbij het systeem afwisselend aan- en uitgeschakeld is.

#### 1.2.3 *Vegetatie Vaassen*

Het effect van een bestaande strook vegetatie (loofbomen en struiken) is in twee campagnes langs de A50 nabij Vaassen onderzocht. De eerste campagne was in de zomer van 2008 en duurde zes weken. De tweede campagne was in de winter van 2009 en duurde twee weken. De bijdrage van de weg aan de concentratie aan de lijzijde van de weg is bepaald. In het voorveld (de loefzijde van de weg) is een achtergrondstation geïnstalleerd.

De meetopstelling bestond uit twee identieke opstellingen: één achter de vegetatie (vegetatielij) en één in het vrije veld (referentielijn). Op elke lijn is op vier posities met toenemende afstand tot de wegrand gemeten. Het eerste meetpunt op de vegetatielij bevond zich voor de vegetatie, de andere erachter. Via een kleppensysteem is NO<sub>x</sub> op de acht meetpunten om en om gemeten. Het effect van de vegetatie is afgeleid uit het verschil in wegbijdrage tussen de referentielijn en de vegetatielij.

N.B. voorafgaand aan deze studie is op dezelfde locatie in 2006 een pilotstudie uitgevoerd. De resultaten van deze studie zijn niet in dit rapport opgenomen.

#### 1.2.4 *Vegetatie Valburg*

Het experiment in Valburg is qua opzet goed vergelijkbaar met dat in Vaassen. Enkele verschillen zijn belangrijk: het experiment is uitgevoerd aan een speciaal daarvoor geplaatste vegetatiestrook bestaande uit loofbomen en naaldbomen. Verder is het experiment gedurende een periode van negen maanden uitgevoerd. Aan de lijzijde zijn twee vegetatielijnen uitgezet en één referentie lijn. De concentratie van gassen en fijn stof is op een aantal hoogten bepaald. Uiteindelijk zijn de metingen op verschillende hoogten voor en achter de vegetatie gebruikt om vast te stellen welk percentage van de luchtverontreiniging de vegetatie afvangt. In het voorliggende rapport is slechts dit deel van de metingen voor de evaluatie gebruikt.

### 1.2.5 *A73 Nijmegen*

In het kader van de prijsvraag "Schoner, Stiller en Homogener Asphalt" is onder andere het effect van het sproeien van calciumchloride op het opwervelen van fijn beproefd. De eerste resultaten waren positief. Om het effect met voldoende zekerheid te kunnen vaststellen heeft DVS met Nido een tweede experiment opgestart. Er zijn in de winter van 2008/2009 en de zomer van 2009 experimenten uitgevoerd op de A73 bij Nijmegen. Deze locatie biedt de mogelijkheid gelijktijdig het effect te beproeven op een open en een dicht wegdek. (ZOAB en DAB)

Aan de noordoostkant van de A73 zijn op enkele honderden meters uit elkaar drie meetpunten ingericht. Het eerste betreft het referentiepunt, het tweede en derde zijn gelegen aan het dichte en open wegdek dat besproeid is met calciumchloride. Aan de zuidwest kant van de weg is een achtergrondpunt geplaatst.

### 1.2.6 *Dynamax*

Vanaf april 2009 voert Rijkswaterstaat op de A58 bij Tilburg een pilot uit waarbij gekeken wordt wat het effect van een dynamische snelheidsverlaging is op de luchtkwaliteit. Deze proef is onderdeel van een grotere evaluatie van verschillende maatregelen met dynamische snelheid door Rijkswaterstaat ("Dynamax"). Op dagen dat de verwachte daggemiddelde concentratie van PM<sub>10</sub> de grenswaarde van 50 µg/m<sup>3</sup> overschrijdt, wordt de maximumsnelheid verlaagd van 120 naar 80 km/uur. De fijn-stofverwachting wordt gemaakt door het KNMI. TNO deed onderzoek naar het effect op PM<sub>10</sub> / PM<sub>2.5</sub> concentraties, terwijl M+P het effect op de NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> concentraties onderzocht.

Er zijn twee meetdoorsneden gekozen: de referentie (geen maatregel) en de experimenteerdoorsnede (maatregel). Bij beide doorsneden zijn aan beide kanten van de weg identieke meetpunten ingericht, zodat de wegbijdrage bepaald kan worden bij wind uit twee richtingen.

De meetcampagne is onlangs verlengd met drie maanden tot half januari 2010 omdat de maatregel vanwege de verwachtingen van de weersomstandigheden nog te weinig in praktijk is gebracht.

## 1.3 **Leeswijzer**

De zes hierboven beschreven "grote" projecten dienen als bron voor de "lessons learned". In hoofdstuk 2 worden de onderzoeksmethodieken beschouwd. Hoofdstuk 3 beschrijft de ervaringen met de gebruikte meetapparatuur. De gebruikte analysemethoden komen in hoofdstuk 4 aan bod. In hoofdstuk 5 en 6 worden tot slot meetonzekerheden, praktijkzaken en kwaliteitsborging beschouwd.

## 2 Methodieken

### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is gekeken naar de verschillende methodieken die zijn toegepast in de IPL onderzoeken. Daarbij komen de volgende onderwerpen aan bod:

- Wordt het effect uitgedrukt in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (absoluut) of in % (relatief)? Dit stelt eisen aan de meetapparatuur met name voor fijn stof. De ruwe meetdata van continue monitoren voor fijn stof zijn niet gelijkwaardig aan de absolute concentratie gemeten met de referentiemethode. Hoe wordt daarmee omgegaan?
- Wordt het effect bepaald ten opzichte van de totale concentratie of ten opzichte van de bijdrage van het verkeer? De maatregelen richten zich op de bijdrage van het verkeer en niet op de achtergrondconcentratie. Voor fijn stof is de wegbijdrage maar een kleine fractie van de totale concentratie. Hoe wordt de bijdrage van het verkeer bepaald?
- Hoe vindt de vergelijking plaats tussen de referentie- en maatregelsituatie? Gebeurt dat ruimtelijk (naast de proeflocatie is ook een referentielocatie aanwezig) of temporeel (de maatregel wordt discontinu ingezet)?

In tabel 1 is per project met steekwoorden een samenvatting gemaakt van de bovenstaande zaken. Daarin vallen overeenkomsten en verschillen tussen de projecten direct op. De effecten zijn in alle projecten relatief uitgedrukt en er is in de meeste projecten gewerkt met de effecten op de wegbijdrage en een ruimtelijke vergelijking tussen referentie en- maatregelsituatie. In paragraaf 2.2 wordt per onderwerp een uitwerking gegeven.

**Tabel 1**  
Overzicht methodieken

<b>Naam</b>	<b>Effect in <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> of % (zie 2.2.1)</b>	<b>Effect t.o.v. (zie 2.2.2)</b>	<b>Referentie/maatregelsituatie (zie 2.2.3)</b>
Proeftuin Schermen	%	Bijdrage verkeer (bij één windhoek)	Ruimtelijk met een continue maatregel
Thomassentunnel	%	Bijdrage verkeer (concentratietoename in tunnel)	Temporeel
Vegetatie Vaassen	%	Bijdrage verkeer (bij één windhoek)	Ruimtelijk met een continue maatregel
Vegetatie Valburg	%	Totale concentratie (vergelijking van massaflux voor en achter de vegetatie)	Niet aan de orde
A73 Nijmegen	%	Bijdrage verkeer (bij één windhoek)	Ruimtelijk met een discontinue maatregel
Dynamax	%	Bijdrage verkeer (bij twee windhoeken)	Ruimtelijk met een discontinue maatregel

## 2.2 Informatie

### 2.2.1 *Absolute versus relatieve concentratiemetingen*

In alle proeven wordt het effect van de te onderzoeken maatregel uitgedrukt in % (relatief) en niet in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (absoluut).

Het is voor fijn stof namelijk zeer lastig om effecten van maatregelen uit te drukken in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Enerzijds omdat de referentiemethode (het bemonsteren van filters met LVS systemen) in de tijd een te laag oplossend vermogen heeft. Anderzijds is gebleken dat monitoren, die wel met een hoge tijdsresolutie kunnen meten, niet altijd gelijkwaardig zijn aan referentiemetingen. De concentratie wordt door deze automatische monitoren in de praktijk vaak onderschat (voor meer informatie over de automatische monitoren, zie hoofdstuk Apparatuur).

Voor de relatieve vergelijking is het minder van belang dat de absolute concentraties juist gemeten worden, maar is de onderlinge vergelijkbaarheid tussen monitoren (between sampler vergelijkbaarheid) belangrijk.

De metingen van fijn stof zijn met automatische monitoren uitgevoerd. Daarbij is vaak wel ter controle een vergelijking gemaakt met de referentiemethode (LVS) op een of twee meetpunten, maar de concentraties zijn niet gekalibreerd op de referentiemetingen.

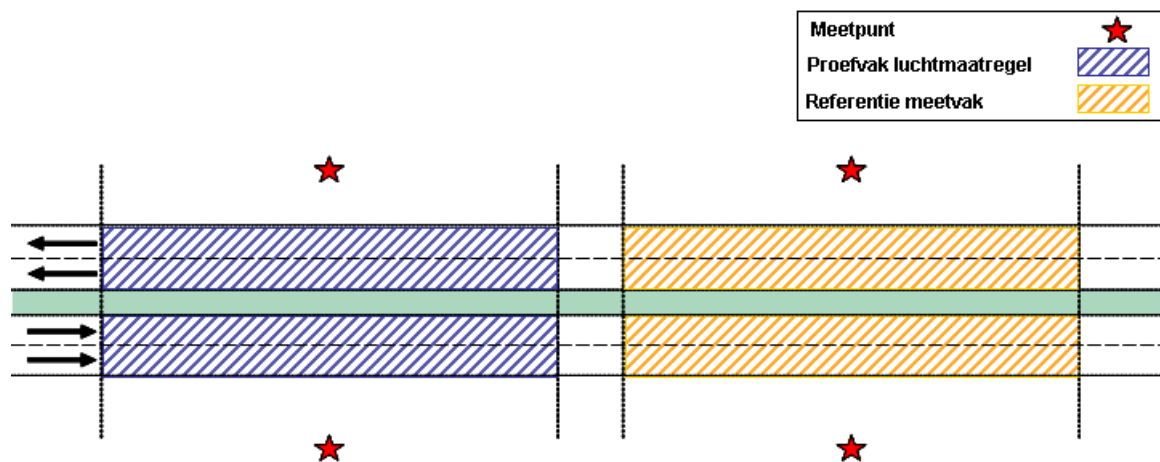
NO<sub>x</sub> metingen zijn met referentiemonitoren uitgevoerd, die tijdens de proeven regelmatig gekalibreerd zijn. Er mag daarom van uitgegaan worden dat metingen de juiste concentraties in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  aangeven. Voor NO<sub>x</sub> zou het effect dan ook in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  gegeven kunnen worden. In de praktijk is er toch voor gekozen om het effect in % uit te drukken om te kunnen vergelijken met fijn stof en met andere studies.

### 2.2.2 *Totale concentratie vs bijdrage van verkeer*

In alle proeven (behalve Valburg, zie beschrijving aan het eind van deze paragraaf) is het effect bepaald ten opzichte van de bijdrage aan de concentratie door het verkeer.

In de projecten langs snelwegen is de bijdrage van verkeer afgeleid uit de verschillen tussen de concentraties gemeten aan de lizijde van de weg (het belaste punt) en aan de loefzijde van de weg (het onbelaste punt), zie figuur 1. Er is daar op verschillende manieren invulling aan gegeven:

- Aan beide kanten van de weg liggen meetpunten zodat bij wind uit twee richtingen de wegbijdrage bepaald kan worden. Hiervoor is gekozen in het Dynamax project;
- Aan een kant van de weg ligt een achtergrondmeetpunt, aan de andere kant de belaste meetpunten. Op deze manier kan slechts bij wind uit één richting de wegbijdrage bepaald worden. Hiervoor is gekozen in het project Proeftuin Schermen, Vaassen en bij de A73 Nijmegen. In deze projecten is het achtergrondmeetpunt in de nabijheid van de weg geplaatst. Ook bij Valburg was een achtergrondmeetpunt ingericht maar deze is in de analyse niet betrokken.



**Figuur 1**  
 Meetopstelling volgens het  
 Loef-Lij concept in de  
 variant met referentie  
 meetvak

In de projecten waarbij de maatregel direct invloed heeft op de emissie van het verkeer (Dynamax, A73 Nijmegen) is aan de lizijde van de weg op één bepaalde afstand van de wegrand een meetpunt ingericht.

In de projecten waarbij de verspreiding van de emissies van het verkeer beïnvloed wordt (schermen en vegetatie) is aan de lizijde op verschillende afstanden gemeten:

- Proeftuin Schermen: op 5 m, 10 m en 28,5 m achter de schermen. Een grotere afstand was niet mogelijk vanwege beperkingen in de ruimte;
- Vegetatie Vaassen: op 3 m van de wegrand (voor de vegetatie) en op 13 m, op 38 m en op 87 m van de wegrand (achter de vegetatie). Bij de referentiedoorsnede is op nagenoeg dezelfde afstanden gemeten behalve het 2<sup>e</sup> meetpunt, welke op 24 m van de wegrand lag;
- Vegetatie Valburg: dichtbij de wegrand (voor de vegetatie), op 10 m achter de vegetatie en op 80 m achter de vegetatie.

Het project in de Thomassentunnel is uniek binnen het IPL, omdat daar in een tunnel is gemeten en niet in de buitenlucht. De bijdrage van het verkeer is in de tunnel gemeten door bij zowel de tunnelingang als –uitgang de concentraties te meten. De concentratietoename is het gevolg van verkeersemissies in de tunnel.

Slechts een enkele keer is ook gekeken naar het effect op de totale concentratie. Bijvoorbeeld in het project A73 Nijmegen. Daar bleek echter dat er onvoldoende data beschikbaar waren om het relatief kleine effect op de totale fijn stof concentratie aan te tonen (de wegbijdrage is voor fijn stof slechts een klein gedeelte van de totale concentratie). Bovendien waren de metingen van fijn stof niet gebaseerd op referentiemetingen (zie paragraaf 2.2.1). Het absolute niveau van de gemeten concentratie is daarmee niet gegarandeerd.

In het Valburg-project is het effect uitgedrukt als percentage van de totale concentratie dat wordt afgevangen door de vegetatie. Daartoe zijn voor en achter de vegetatie massafluxen berekend op basis van de metingen op verschillende hoogten. Het verschil in de massafluxen voor en achter de vegetatie wordt gegeven

als afvangst percentage. Er is uiteindelijk geen gebruik gemaakt van de referentielocatie en het achtergrondmeetpunt.

### 2.2.3

#### *Vergelijking referentie- en maatregelsituatie*

De effecten zijn vaak bepaald uit een vergelijking tussen situaties waarin de maatregel van kracht was en situaties zonder de maatregel (referentiesituaties). Het probleem daarbij is dat er naast de maatregel ook nog andere variaties kunnen optreden tussen de situaties. Die variaties zouden dan ten onrechte geïnterpreteerd worden als het effect. In deze paragraaf wordt beschreven op welke manieren de vergelijking tussen maatregel- en referentiesituatie zijn uitgevoerd en hoe met de variaties in andere variabelen rekening is gehouden.

De vergelijking tussen situaties zonder en met een maatregel is op verschillende manieren uitgevoerd. De keuze is bepaald door de aard van de maatregel:

- a) Ruimtelijk met een continue maatregel. Hierbij worden metingen op een referentie- en maatregeldoorsnede gelijktijdig uitgevoerd. De maatregel op de maatregeldoorsnede is altijd van kracht. Hier vallen de Proeftuin Schermen en de vegetatieprojecten onder.
- b) Ruimtelijk met een discontinue maatregel. Hierbij worden metingen op een referentie- en maatregeldoorsnede gelijktijdig uitgevoerd. De maatregel op de maatregeldoorsnede wordt variabel ingezet. Hier vallen A73 Nijmegen en Dynamax onder.
- c) Temporeel. Hierbij wordt op dezelfde locatie de maatregel sequentieel ingezet. Hier valt de Thomassentunnel onder. In de tunnel is de maatregel afwisselend aan- en uitgezet.

Bij vergelijkingen in de ruimte en de tijd is het van belang dat de omstandigheden (anders dan de maatregel) vergelijkbaar zijn. Bij bovenstaande methodieken kunnen de volgende variaties aan de orde zijn:

#### Ad a en b)

- Verschillen in verspreidingsregime tussen de twee locaties (bijv. obstakels)
- Verschillen in verkeersintensiteit of samenstelling (bijv. als er een op- of afrit tussen ligt)
- Verschil in aanwezigheid van lokale bronnen
- Verschil in de helling van de weg (waardoor de emissie anders wordt)
- Verschillen in oriëntatie van de weg, zodat de keuze voor de windhoek en daarmee het aantal datapunten beperkt wordt.

#### Ad c)

- Fluctuaties in verkeersintensiteit en samenstelling
- Fluctuaties in verspreidingscondities

Tijdens de proeven is als volgt omgegaan met deze variaties:

#### Ad a )

- Proeftuin Schermen: de doorsneden lagen binnen 500 meter van elkaar, waardoor de oriëntatie hetzelfde was. Tijdens de laatste drie maanden is bij een van de schermdoorsneden geen scherm geplaatst om een tweede 0-doorsnede te maken. Dit is gedaan om de representativiteit van de 0-doorsnede te



onderzoeken. Daaruit bleek dat er een significant verschil was tussen beide 0-doorsneden. Zowel de gemeten concentratie dichtbij de weg als de verdunning met de afstand van de weg bleek te verschillen. Dit verschil is meegenomen als additionele onzekerheid.

- Vegetatie Vaassen: de doorsneden lagen direct naast elkaar (binnen 250 meter), waardoor de oriëntatie van de weg hetzelfde was en de andere verschillen minimaal waren.
- Vegetatie Valburg: de doorsneden lagen direct naast elkaar, waardoor de oriëntatie van de weg hetzelfde was en de andere verschillen minimaal waren. Uiteindelijk is in de analyse op basis van de metingen geen gebruik gemaakt van de referentielocatie.

Ad b)

- A73 Nijmegen: omdat bij het toepassen van  $\text{CaCl}_2$  een deel van het zout door autobanden versleept wordt, moesten de proefvakken voldoende afstand tot elkaar hebben. Een van de maatregeldoorsneden lag binnen 1 km van de referentiedoorsnede, de tweede (met ander wegdek) lag echter op 5 km afstand. Ook was de oriëntatie van de 2e maatregeldoorsnede met 45 graden verschoven ten opzichte van de referentiedoorsnede. Dit resulteerde in een beperktere dataset van gelijktijdig gemeten wegbijdragen. De verschillen tussen de doorsneden wanneer er geen maatregel van kracht was zijn bepaald en deze bleken significant. Er is hiervoor echter niet gecorrigeerd bij het bepalen van het effect van het sproeien van  $\text{CaCl}_2$ . Deze hebben er mogelijk wel toe bijgedragen dat het effect niet significant vastgesteld kon worden. Het achtergrondmeetpunt dat in de referentiedoorsnede lag bleek bovendien sterk beïnvloed te worden door de lokale verspreidingscondities. In de zomersessie is de meting herhaald. In de zomersessie zijn de meetpunten zo gekozen dat de oriëntatie wel vergelijkbaar was. Toch blijkt uit de voorlopige resultaten dat er nog steeds sprake is van significante verschillen tussen de meetdoorsneden. De resultaten van de zomersessie worden hiervoor wel gecorrigeerd.
- Dynamax: hoewel de referentie- en maatregeldoorsnede ongeveer 5 km uit elkaar liggen, verschilt de oriëntatie nauwelijks van elkaar. De verschillen tussen de doorsneden ten tijde dat er geen maatregel van kracht was zijn bepaald en deze blijken significant (circa 15%). Een van de redenen kan zijn dat er tussen de doorsneden een op- en afrit ligt. Onderzoek naar de verkeersintensiteiten en aandeel vrachtverkeer is nog gaande. Op basis van actuele verkeersgegevens kan met behulp van een uur tot uur snelwegmodel de luchtkwaliteit berekend worden. Dit zal gebruikt worden om voor verschillen tussen de locaties, anders dan de maatregel, te corrigeren.

Ad c)

- Thomassentunnel: Om voor de fluctuaties in omstandigheden die de concentratietoename van fijn stof beïnvloeden te corrigeren, wordt een schaling toegepast met de toename van de concentratie van  $\text{NO}_x$ . Aangenomen wordt dat deze fluctuaties op dezelfde manier doorwerken voor fijn stof als voor  $\text{NO}_x$ . Er is eerst onderzocht of  $\text{NO}_x$  inderdaad niet beïnvloed wordt door de maatregel zelf.

### 2.3 Evaluatie

De gekozen methodiek moet erop gericht zijn om onzekerheden in de analyse van het effect zoveel mogelijk te minimaliseren. Vooraf moet dan ook een goede schatting gemaakt worden van de foutenbronnen (zie ook hoofdstuk 5 over onzekerheden). Uit de evaluatie van de ervaringen in de projecten komen een aantal aandachtspunten en aanbevelingen naar voren die hieronder besproken worden.

#### *Bepaal het effect van de maatregel in eerste instantie ten opzichte van de bijdrage van het verkeer*

Als maatregelen gericht zijn op de bijdrage van verkeer aan de concentratie van PM en NO<sub>x</sub>, is de vraag die in eerste instantie beantwoord moet worden: wat is het effect op de bijdrage van het verkeer?

Het meten van een bronbijdrage vanaf één locatie is met de huidige stand der techniek niet goed mogelijk. Daarom moeten er voor het meten van de verkeersbijdrage minimaal twee meetpunten ingericht worden (een onbelast achtergrondpunt en een belast punt). Het nadeel daarvan is dat twee monitoren nooit precies hetzelfde meten. Dat is vooral voor fijn stof een belangrijk punt omdat de concentratieverschillen tussen het onbelaste en belaste punt relatief klein zijn.

Stel dat er in de toekomst een meetmethode wordt ontwikkeld waarmee vanaf één meetpunt de bijdrage van het verkeer betrouwbaar gemeten zou kunnen worden, zou dat veel onzekerheid wegnemen. Zolang die oplossing er niet is, zal met automatische monitoren gemeten moeten worden (het is voor fijn stof praktisch niet mogelijk om metingen van de massaconcentratie met de referentiemethode op een tijdschaal van een uur uit te voeren). De concentratie die deze monitoren meten is niet gelijkwaardig aan de referentiemethode (meestal wordt een lagere concentratie gemeten). Daarom wordt aanbevolen om het effect procentueel uit te drukken.

#### *Bepaal het effect van de maatregel in tweede instantie ten opzichte van de totale concentratie*

In tweede instantie is het nuttig om te bepalen wat het effect van de maatregel is op de totale concentratie. Als de bijdrage van het verkeer immers relatief klein is (zoals bij fijn stof) zal het effect op de totale concentratie ook relatief klein zijn. Het is nodig om het effect op de totale concentratie te weten in verband met het toetsen aan de grenswaarden.

Dit kan bijvoorbeeld door uit de metingen de verhouding tussen de wegbijdrage en de heersende concentratie te schatten of door gebruik te maken van een luchtkwaliteitmodel.

#### *Maak een weloverwogen keuze voor de meetlocaties Afstand tot de wegrand*

Het is in het belang van de vergelijkbaarheid om in verschillende meetcampagnes te meten op dezelfde afstand tot de weg. Het wordt aanbevolen om de door verkeer belaste meetlocatie zo te kiezen dat er op 10 meter van de wegrand gemeten kan worden. Dit is de wettelijke toetsafstand (Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit 2007).

Bij maatregelen gericht op de verspreiding van de verkeersemisies, zoals vegetatie en schermen, is het echter nuttig om op meerdere afstanden tot de weg te meten. De afstand kan namelijk bepalend zijn voor de grootte maar ook voor het teken (verbetering/verslechtering) van het effect. Door op meerdere afstanden te meten wordt inzicht verkregen of het effect een continue functie is van de afstand van de weg. Voor deze afstanden zijn geen richtlijnen beschikbaar, maar gedacht kan worden aan afstanden tussen 20 en 100 meter.

#### *Vergelijkbaarheid van de meetlocaties*

Om de vergelijkbaarheid van de referentie- en de maatregellocatie te waarborgen wordt aanbevolen om meetlocaties te kiezen

- waarop naast verkeer geen andere lokale bronnen aanwezig zijn, ook niet in de achtergrond (plaats bijv. een stroomaggregaat niet in de directe nabijheid van de meetlocatie);
- waarop geen obstakels aanwezig zijn die de verspreiding beïnvloeden;
- die niet in de buurt van op- of afritten of parkeerplaatsen liggen;
- waartussen geen op- of afrit aanwezig is;
- waarbij de weg hetzelfde aantal rijstroken heeft;
- waarbij de oriëntatie en helling van de weg niet veel verschilt;
- die ver genoeg uit elkaar liggen om beïnvloeding van de referentielocatie door de maatregel te voorkomen. Dit geldt bijvoorbeeld voor het sproeien van de weg en snelheidslimieten.

#### *Achtergrondpunt(en)*

De keuze voor de locatie van het (de) achtergrondpunt(en) hangt af van de situatie:

- als er in de meetdoorsnede slechts één belast meetpunt is (op slechts één afstand tot wegrand) wordt het aanbevolen om te zoeken naar een locatie waarbij aan beide kanten van de weg meetpunten ingericht kunnen worden, die afhankelijk van de windrichting als achtergrond- of belaste locatie aangemerkt kunnen worden. Op die manier kan bij wind uit twee richtingen de wegbijdrage bepaald worden en wordt de dataset vergroot. Deze opstelling moet dan zowel voor de referentie- als maatregeldoorsnede gemaakt kunnen worden;
- als er met meerdere meetpunten gewerkt wordt, zoals bijvoorbeeld bij het onderzoek naar schermen, is het waarschijnlijk praktischer om aan een kant van de weg de achtergrondlocatie te kiezen en aan de andere kant de belaste punten.

Het wordt aanbevolen om bij zowel de referentie- als de maatregeldoorsnede een achtergrondlocatie in te richten. Dit is niet van belang wanneer de meetlocaties dicht bij elkaar liggen en voldaan is aan de punten die hiervoor genoemd zijn onder "Vergelijkbaarheid van de meetlocaties".

#### *Oriëntatie van de weg*

Indien de meetlocatie niet gekoppeld is aan een bepaald studiegebied, wordt aanbevolen om een weg te kiezen met een noord-zuid oriëntatie. Op die manier kan optimaal geprofiteerd worden van de meest voorkomende windrichting in Nederland (meest westelijk). De windrichting is namelijk bepalend of metingen in de analyse van de wegbijdrage meegenomen kunnen worden.

Als de proef gericht is op het verminderen van het aantal overschrijdingsdagen, dan heeft ook een weg met noord-zuid oriëntatie de voorkeur omdat in Nederland

overschrijdingsdagen vaak voorkomen bij oostenwind. In die zin is de A58 met een oost-west oriëntatie als proeflocatie in Dynamax niet gelukkig gekozen.

*Corrigeer voor variaties die niet het gevolg zijn van de maatregel*

Indien de beschikbaarheid van meetlocaties geen belemmering is, wordt aanbevolen om een referentie- en een maatregellocatie in te richten (vergelijking in de ruimte, zie paragraaf 2.2.3). Afhankelijk van de beschikbare tijd zou gedurende een deel van de meetcampagne de maatregel niet van kracht moeten zijn. Op die manier kunnen verschillen tussen de referentie- en maatregellocatie bepaald worden en kan ervoor gecorrigeerd worden.

Als een vergelijking in de tijd de enige mogelijkheid is (zoals bijvoorbeeld bij een tunnel) is het belangrijk om te corrigeren voor fluctuaties in de tijd. Dat kan door:

- metingen uit te voeren van een stof die niet beïnvloed wordt door de maatregel, maar wel de invloed van andere variabelen (emissie en verspreiding) representeert (tracerstof). Bij de Thomassentunnel is hiervoor de NO<sub>x</sub> gebruikt die geëmitteerd wordt door het verkeer;
- metingen uit te voeren van variabelen die de bijdrage van het verkeer beïnvloeden (verkeer en meteorologie). De invloed van deze variabelen kan dan m.b.v. een luchtkwaliteitsmodel op uurbasis bepaald worden.

*Overweeg voor NO<sub>x</sub> te werken met één monitor d.m.v. aanzuiging vanaf verschillende meetpunten ipv met meerdere monitoren*

Om onzekerheden als gevolg van between sampler onzekerheid tussen monitoren uit te sluiten kan voor NO<sub>x</sub> gewerkt worden met een kleppensysteem. Dit houdt in dat er vanaf één monitor aanzuigleidingen naar de meetpunten lopen en d.m.v. een kleppensysteem telkens lucht van één meetpunt aangezogen wordt. Bij een voldoende snelle schakeling tussen de meetpunten levert de middeling van de gemeten concentraties een representatieve concentratie voor een bepaald tijdsinterval voor alle meetpunten. Dit kan bereikt worden door de aanzuigleidingen te voorzien van een eigen pomp en kleppensysteem dichtbij de monitor.

Als de meetpunten niet verder dan 20 meter van de monitor verwijderd liggen wordt aan dit systeem de voorkeur gegeven. Bij afstanden groter dan 20 meter neemt de onzekerheid sterk toe, doordat het luchtmengsel dan te veel verandering kan ondergaan (o.a. door verwarming om condens in het systeem te voorkomen en reactie van NO met ozon).

Het kleppensysteem is niet geschikt voor fijn stof. Naast verandering van aerosolen in de aanzuigleiding, slaan deeltjes neer op de wanden van de aanzuigleidingen in bochten of andere oneffenheden zoals kleppen. Dit laatste gebeurt ook met gassen (zoals NO<sub>x</sub>), maar in veel mindere mate dan bij deeltjes.

- Les 1: Bepaal het effect van de maatregel in eerste instantie ten opzichte van de bijdrage van het verkeer. Daar is de maatregel immers op gericht.
- Les 2: Bepaal het effect van de maatregel in tweede instantie ten opzichte van de totale concentratie. Dit is nodig bij het toetsen aan de wettelijke grenswaarden.
- Les 3: Meet op een afstand van ca 10 meter van de weg (wettelijke toetsafstand). Zorg bij schermen e.d. voor meetpunten op meerdere afstanden van de weg in een lijn.
- Les 4: Zorg dat de referentie- en maatregellocatie vergelijkbaar zijn.
- Les 5: Als er op slechts een afstand tot de weg gemeten wordt, probeer dan een locatie te vinden waarbij aan beide kanten van de weg meetpunten ingericht kunnen worden, die afhankelijk van de windrichting als belast en onbelast meetpunt kunnen dienen. Zo kan de dataset vergroot worden.
- Les 6: Indien de meetlocatie niet gekoppeld is aan een bepaald studiegebied wordt aanbevolen om een weg te kiezen met een noord-zuid oriëntatie. Vanwege de overheersende windrichting vergroot dit de kans op bruikbare data.
- Les 7: Corrigeer voor variaties die niet het gevolg zijn van de maatregel om te voorkomen dat deze ten onrechte voor een effect worden aangezien (of zorg voor een onderschatting van het effect).
- Les 8: Overweeg voor NO<sub>x</sub> te werken met één monitor d.m.v. aanzuiging vanaf verschillende meetpunten in plaats van met meerdere monitoren. Dit kan de onzekerheid reduceren.

## 3 Apparatuur

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de meetapparatuur beschouwd die bij de verschillende meetonderzoeken is gebruikt. Er wordt ingegaan op de verschillende eigenschappen van de apparatuur en de ervaringen die ermee zijn opgedaan.

### 3.2 Informatie

In de verschillende projecten is gebruik gemaakt van een breed scala aan meetapparatuur. Grofweg kan er een verdeling gemaakt worden in continue en discontinue meetmethoden. Het grote voordeel van continue meetsystemen is de mogelijkheid gedetailleerde analyses te doen op bijvoorbeeld uurgemiddelde data. Hiermee is het mogelijk het verloop van de verkeeremissies gedurende de dag zichtbaar te maken. De niet-continue meetmethoden geven vaak etmaal- of weekgemiddelde waarden. In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van de apparatuur die bij de analyse is gebruikt.

naam	apparatuur fijn stof	apparatuur NOx
Proeftuin Schermen	Osiris, Teom, LVS	Airpointer
Thomassentunnel	Teom, Grimm, LVS	Airpointer
Vegetatie Vaassen	Teom	Eco physics CLD 700 AL
Vegetatie Valburg	Teom, Dustrak, LVS	NOx monitor
A73 Nijmegen	Teom, LVS	Airpointer
Dynamax	Osiris	Airpointer

Naast de veelgebruikte apparatuur voor fijn stof en NOx is in alle onderzoeken windsnelheid en windrichting gemeten. In het onderzoek in de Thomassentunnel en de proeftuin schermen is met een verkeersteller gewerkt.

### 3.3 Veelgebruikte apparatuur

#### 3.3.1 NOx

Voor NOx, NO en NO2-metingen wordt vaak gebruik gemaakt van continue systemen gebaseerd op chemoluminescentie. Bij chemoluminescentie wordt bij een gecontroleerde chemische reactie tussen stikstofmonoxide en ozon energie afgegeven in de vorm van licht. Een lichtdetector meet de hoeveelheid licht op basis waarvan de concentratie van het gemeten gas kan worden afgeleid. In de projecten is gebruik gemaakt van meetunits zoals de Eco Physics en de Airpointer uitgerust met een Thermo-meetbank.

**Figuur 2**

Continue meetinstrumenten voor o.a. NO<sub>2</sub> op basis van chemieluminescentie (links Airpointer (foto M+P) rechts ECO PHYSICS (foto www.ecophysics.com))



De ervaringen met de Airpointers zijn positief. Een verificatieregime en onderhoudsinterval volgens specificaties blijkt voldoende om de apparatuur betrouwbaar te laten functioneren. In Vaassen bleek, vanuit de rapportage, dat de ECO Physics monitoren slecht onderling vergelijkbaar waren. Wat de oorzaak was, is onduidelijk. De data is achteraf fors gecorrigeerd. Er is overigens geen reden om in zijn algemeenheid aan de kwaliteit van de ECO Physics monitoren te twijfelen. De ervaring van TNO en M+P met verschillende NO<sub>x</sub>-monitoren is dat alle bekende monitoren van goede kwaliteit zijn.

### 3.3.2

#### *Fijn stof*

Er zijn verschillende soorten fijn-stofmonitors gebruikt. Naast de referentieapparatuur is er een aantal verschillende typen continue meetinstrumenten gebruikt. Onderlinge verschillen zitten voornamelijk in het meetprincipe.

#### *Referentie-apparatuur*

Referentiemeetapparaten conform NEN-EN 12341, zogenaamde Low Volume Samplers (LVS) zijn gebruikt voor het meten van PM<sub>10</sub> en PM<sub>2.5</sub>. De LVS verzamelt over de periode van 24 uur het stof op een filter, waarbij door weging voor- en achteraf in het laboratorium de gemiddelde concentratie over die 24 uur bepaald kan worden. Afhankelijk van de inlaatkop kan PM<sub>10</sub> of PM<sub>2.5</sub> gemeten worden. In een aantal projecten is gebruik gemaakt van de LVS van Derenda. De ervaring is dat het apparaat bij voldoende onderhoud aan het mechaniek van de wisselaar van de filters probleemloos functioneert.



**Figuur 3**

Fijn stof meetapparatuur,  
van links naar rechts LVS,  
Osiris, Grimm

#### *Lichtverstrooiing*

Het Osiris meetsysteem van het merk Turn-key meet fijn stof. De Osiris is gebaseerd op lichtverstrooiing. De grootte van het deeltje wordt ingeschat op basis van voorwaartse verstrooiing van een laserbundel, zodat met de Osiris continu ook een verdeling van de gemeten stof naar grootte gedaan wordt. De inlaat wordt verwarmd om condens in het apparaat te voorkomen en om te voorkomen dat vochtdeeltjes voor stof wordt aangezien. Het Dustrak meetsysteem van TSI werkt, op de inlaatverwarming na, op een vergelijkbare manier als de Osiris.

Uit ervaring met de Osiris blijkt dat deze gevoelig is voor vocht. De inlaat wordt continu, zonder regeling, verwarmd. Er zijn onderlinge verschillen in inlaattemperatuur geconstateerd. Daarnaast is de inlaat in de zomermaanden vrij gevoelig voor vervuiling door insecten. Een gedeeltelijke verstopping leidt tot een "sprong" in de gemeten niveaus. Regelmatige inspectie en onderhoud zijn voor de goede werking van belang.

De ervaring met de Dustrak is dat de bedrijfszekerheid beperkt is. Daarnaast heeft de Dustrak geen inlaatverwarming met als gevolg dat vocht een enorme impact heeft op de gemeten niveaus. In het project bij Valburg bleken de massaconcentraties 1 tot 2 orden van grootte hoger te zijn dan massaconcentraties gemeten met TEOM's.

In het project proeftuin schermen bleken de Osiris-data (onder andere als gevolg van drift) slecht bruikbaar. Resultaten op basis van de Osiris zijn daarom niet in de conclusies binnen dat project opgenomen. In het Dynamax project is besloten om overall een 2<sup>e</sup> monitor bij te plaatsen, om de drift in de gaten te houden. Op die manier zijn de Osiris-data toch bruikbaar gebleken

#### *Spectrometer*

De Environcheck van GRIMM (GRIMM #365) is een compleet monitoringsysteem, gebaseerd op de veelgebruikte stationaire aërosolspectrometer GRIMM#179. Deze spectrometer is technisch gezien identiek aan de GRIMM#180, een spectrometer in een 19 inch uitvoering die vaak in vaste meetstations gebruikt worden. Het voordeel



van de Envirocheck is de compacte behuizing (circa 70 x 45 x 40 cm). Deze behuizing bevat behalve de spectrometer een automatische ventilatie en verwarming, twee vacuümpompen voor de bemonstering van de lucht en het ontvochtigingssysteem en een geïntegreerde ontvochtiger (permeatiedroger). Voor een foto van de Envirocheck, zie figuur 3.

In het Thomassentunnel project bleek de Grimm (waarschijnlijk onder invloed van het elektrostatisch veld) zodanig sterk inwendig te vervuilen dat de meetdata niet bruikbaar waren voor de analyse.

#### TEOM

De TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) is een continu meetsysteem voor fijn stof uit de 1400-serie van Thermo (voorheen Rupperecht & Patashnick). De TEOM wordt uitgerust met een PM<sub>10</sub> of PM<sub>2.5</sub> inlaat. De TEOM is een gravimetrisch instrument en werkt op basis van een filter dat is geplaatst op een oscillerende microbalans. Bij toepassing van een PM<sub>10</sub> inlaat worden alleen deeltjes met een diameter kleiner dan 10 micrometer (volgens een gestandaardiseerde curve) doorgelaten. De lucht stroomt dan door een filter en het fijn stof verzamelt zich op het filter. Door de massa-toename van het filter verandert de eigenfrequentie van de microbalans. Iedere twee seconden wordt de massa-toename bepaald. De massa-concentratie PM<sub>10</sub> in de aangezogen lucht wordt aan de hand van de massa-toename en de gemeten "flow" door het filter berekend.

**Figuur 4**  
TEOM fijn stof  
meetapparatuur



De TEOM is in de IPL projecten een veelgebruikt meetinstrument. Er zijn goede ervaringen opgedaan op het gebied van nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en onderhoudsgevoeligheid. In de Thomassentunnel bleken verschillende typen TEOM's beïnvloed te worden door het elektrostatisch veld. Een mogelijke verklaring is dat het oscilleren van het filter verandert als er geladen deeltjes binnenkomen. Een ouder type 1400A bleek vrijwel continu niet goed te presteren tijdens deze proef. Een nieuwer type 1400AB gaf gedurende een periode van 6 dagen ruisachtige data, waarschijnlijk als gevolg van het meetfilter, dat niet helemaal goed geplaatst was. Om beïnvloeding te onderzoeken zijn de TEOM metingen vergeleken met de LVS metingen. De TEOM aan het eind van de tunnel gaf bij een werkend systeem

gemiddeld een lagere concentratie dan de LVS dan bij een niet werkend systeem. De meetperiode waarin de vergelijking tussen TEOM en LVS uitgevoerd is was echter erg kort.

Het waargenomen verschil week, mede daardoor, niet significant van nul af. Op dit moment wordt nog onderzocht hoe hiermee om te gaan in de onzekerheid in de analyse.

#### *Meteo*

In alle onderzoeken is gebruik gemaakt van windmeters en temperatuursensors. Veel gebruikte windmeters zijn van het merk GILL en Vaisala. Sensors voor wind en temperatuur zijn relatief eenvoudig en blijken in het algemeen goed te functioneren. Het is wel van belang dat de windmeters goed "gericht" worden.

#### *Verkeersteller*

In de Thomassentunnel en de proeftuin schermen is gebruik gemaakt van een optische verkeersteller van het merk Smart eye. In de proeftuin schermen is ook gebruik gemaakt van een teller van EIS.

De ervaring met deze tellers is dat de positie en afstelling invloed hebben op de telgegevens. De beste resultaten worden verkregen als de tellers midden boven de rijstroken wordt gemonteerd. Wordt de teller naast de weg geplaatst, dan kunnen maximaal twee rijstroken goed geteld worden.

### **3.4 Evaluatie**

#### *Overzichtstabel*

Vanuit de rapportages blijkt een grote variëteit aan ervaringen die te maken hebben met de gebruikte meetapparatuur. In onderstaande tabel zijn voor de meest gebruikte apparatuur de belangrijkste ervaringen als voor- en nadelen weergegeven.

<b>apparatuur</b>	<b>voordelen</b>	<b>nadelen</b>
Recordum Airpointer (NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- referentiemethode</li> <li>- continue meting</li> <li>- stand alone voor monitoring</li> <li>- kleine behuizing</li> <li>- datacommunicatie met andere apparatuur mogelijk</li> <li>- gedetailleerd online inzicht in bedrijfstoestand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- regelmatig onderhoud nodig (filters wisselen, verificatie)</li> <li>- stroomverbruik (ca. 450 W)</li> </ul>
Eco Physics (NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- referentiemethode</li> <li>- continue meting</li> </ul> <p>(weinig informatie beschikbaar)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vereist inbouw in behuizing</li> <li>- between sampler onzekerheid</li> </ul> <p>(weinig informatie beschikbaar)</p>
LVS (PM <sub>10</sub> of PM <sub>2.5</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- referentiemethode</li> <li>- robuust</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- arbeidsintensief</li> <li>- meet 1 fractie tegelijk</li> <li>- resultaten over langere periodes (24 uur)</li> </ul>
Osiris (TSP, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continue meting</li> <li>- meet gelijktijdig meerdere fracties</li> <li>- goedkoop, makkelijk te installeren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- onderhoudsgevoelig</li> <li>- gevoelig voor meteorologische omstandigheden (luchtvochtigheid)</li> <li>- beperkt online inzicht in bedrijfstoestand</li> <li>- beperkte nauwkeurigheid (between sampler onzekerheid, drift)</li> <li>- onderschatting ten opzichte van de referentiemethode</li> </ul>
Dustrak (fijn stof)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continue meting</li> <li>- goedkoop, eenvoudig te installeren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geen inlaatverwarming</li> <li>- beperkte nauwkeurigheid (between sampler onzekerheid, drift)</li> <li>- beperkte bedrijfszekerheid</li> </ul>
TEOM (PM <sub>10</sub> of PM <sub>2.5</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continue meting</li> <li>- mogelijkheid tot verificatie in het veld</li> <li>- gedetailleerd online inzicht in bedrijfstoestand</li> <li>- nauwkeurig*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vereist inbouw in (grote) behuizing</li> <li>- meet 1 fractie tegelijk</li> <li>- onderschatting ten opzichte van de referentiemethode</li> </ul>
GRIMM (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continue meting</li> <li>- meet gelijktijdig meerdere fracties</li> <li>- klein monitoringssysteem</li> <li>- laag stroomverbruik</li> </ul> <p>(weinig informatie beschikbaar)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- onduidelijkheid ten aanzien van nauwkeurigheid</li> <li>- onderschatting ten opzichte van de referentiemethode</li> </ul> <p>(weinig informatie beschikbaar)</p>

\*) Onderling apparatuurvergelijk, o.a bij westenwind in de proeftuin laten kleine onderlinge verschillen zien van gemiddeld 0,6 µg tussen zeven TEOM's

#### *Gebruikte apparatuur*

Opvallend is dat bij veel projecten min of meer vergelijkbare apparatuur is gebruikt, zelfs van dezelfde fabrikanten. Apparatuur die ook geschikt was geweest, maar in de projecten niet gebruikt is, zijn bijvoorbeeld:

- beta-stof-monitor;
- Thermo NO<sub>x</sub>-monitors.

Daarnaast valt op dat bij meerdere projecten voor PM-metingen tijdens het project inzichten in geschikte meetapparatuur gewijzigd zijn. Het gevolg is dat tijdens het project aanvullende apparatuur is gebruikt, wat achteraf meestal als een verbetering is gezien. Blijkbaar was vooraf onvoldoende in te schatten welke apparatuur (of methode) voor het onderzoek geschikt zou zijn. Nadelen van het wijzigen van de apparatuur tijdens het project zijn:

- extra kosten;
- beperkte datasets (want kortere resterende meetperiode).

De redenen zijn divers:

- te grote onzekerheid (bijv. bij Osiris en Dustrak) om kleine verschillen aan te tonen (Proeftuin Schermen, Dynamax, Valburg);
- invloed van elektrostatisch veld op meetprincipe (Thomassentunnel).

#### *Stroomvoorziening*

Voor alle apparatuur geldt dat er een stabiele en veilige meetlocatie met stroomvoorziening moet worden ingericht. Met name het punt van stroomvoorziening bleek in de praktijk niet altijd even makkelijk te realiseren. Stroomverbruik van 100 tot 800 Watt per meetpunt (Airpointer, TEOM, LVS) heeft in een aantal projecten geleid tot aanleg van bekabeling onder het maaiveld, wat consequenties heeft voor de planning en de kosten.

In meerdere gevallen is gebruik gemaakt van een aggregaat (Vaassen, Valburg, A73) . In het onderzoek bij Vaassen bleek de emissie van de aggregaat de metingen te verstoren doordat het te dichtbij was geplaatst. Bij de CaCl<sub>2</sub> metingen bij de A73 kon beïnvloeding worden voorkomen door het aggregaat op ten minste 200 meter afstand en benedenwinds te plaatsen.

#### *Invloed weersomstandigheden*

Weersomstandigheden zijn vooral van invloed op de PM concentraties. Daarbij gaat het om grote variatie in luchtvochtigheid, temperatuur en het optreden van mist en regen. Alle continue PM-apparatuur werkte daarom met verwarming en/of droging van de lucht, wat de meetnauwkeurigheid beïnvloedt. Het verwarmen van de inlaat zorgt er voor dat volatiele delen vervluchtigen, waardoor de vergelijking met referentieapparatuur (of apparatuur waarbij niet verwarmd wordt) (tijdsafhankelijk) wordt beïnvloed. Daarnaast kunnen bij optische apparaten ten onrechte vochtdeeltjes (of stofdeeltjes met condens) als (grote) stofdeeltjes gedetecteerd worden doordat bij gehanteerde (verschillen in) inlaatverwarming vluchtige delen slechts deels verdampen.

#### *Invloed elektrostatisch veld*

In het Thomassentunnel project bleek de meetsensor van de Grimm sterk te vervuilen. Waarschijnlijk is dit veroorzaakt door de werking van het geteste elektrostatische systeem, waardoor stofdeeltjes geladen worden. De resultaten van de Grimm-metingen waren daardoor niet bruikbaar voor de analyse.

In de Thomassentunnel is ook ervaring opgedaan met het gebruik van twee verschillende typen TEOM's. Het oude type (1400A) heeft een beperkte elektrische afscherming en blijkt ook gevoeliger te zijn voor het elektrostatische systeem. In een apparaatvergelijk in de buitenlucht (Proeftuin en A73) bleken de apparaten wel conform verwachting te functioneren.

Aanbeveling: onderzoek de mogelijkheid om in situaties waarbij een elektrostatisch veld aanwezig is, neutralizers toe te passen op de meetapparatuur. En overweeg daarnaast met verschillende meetmethoden te meten omdat de kans klein is dat alle meetmethoden beïnvloed worden.

#### *LVS*

De LVS referentieapparatuur neemt een bijzondere positie in. Het is met name gebruikt om inzicht te krijgen in de verhouding tussen "referentieniveaus" en de concentraties gemeten met de continue apparatuur.

#### *NOx*

Voor wat betreft NOx-apparatuur zijn vanuit de projecten weinig problemen opgetreden. NOx is voldoende nauwkeurig en relatief probleemloos te meten. In het Valburg-onderzoek worden wel wat problemen gemeld als gevolg van de technische staat van bepaalde apparaten. Opvallend is dat voor NO<sub>2</sub> in de projecten nauwelijks gebruik gemaakt is van passieve metingen. Dat is logisch, in die zin dat met de gebruikte meetmethoden (bepaling wegbijdragen bij specifieke windrichting) een hoge resolutie nodig is. Aan de andere kant, aan de wens om op meerdere locaties en verschillende hoogtes metingen uit te voeren, zou in sommige gevallen met passieve NO<sub>2</sub>-buisjes gedeeltelijk tegemoet gekomen kunnen worden. Op die manier kan de representativiteit van de gekozen meetpunten onderzocht worden.

- Les 9: Tijdens de projecten moest een aantal keer apparatuur toegevoegd worden. Er moet meer aandacht besteedt worden aan het doordacht opstellen van het meetplan. Of: er moet binnen het project ruimte zijn voor aanpassingen. Daartoe is het nodig dat meetdata kort na het beschibaarkomen geanalyseerd worden.
- Les 10: Stroomvoorziening blijkt in de praktijk vaak lastig te realiseren, voor de planning moet hiervoor voldoende tijd gereserveerd worden.
- Les 11: Fijn stof apparatuur werkt veelal met verschillende soorten verwarming en daardoor verschillende gevoeligheid voor meteorologische omstandigheden en waardoor resultaten niet vergelijkbaar zijn. Kies daarom weloverwogen de meetmethode en meetinstrumenten.
- Les 12: Meetapparatuur kan beïnvloed worden in de aanwezigheid van een elektrostatisch systeem. Overweeg het gebruik van "neutralizers".
- Les 13: Meet ook fijn stof met referentieapparatuur. Maak bij voorkeur gebruik van verschillende meetmethoden voor fijn stof zodat een compleet beeld voor de interpretatie beschikbaar is.
- Les 14: Maak geen gebruik van meetapparatuur voor fijn stof zonder inlaatverwarming om te voorkomen dat vocht wordt aangezien voor stofdeeltjes.
- Les 15: Het wordt aanbevolen om locatie te kiezen waar verkeerstellingen met vaste tellussen uitgevoerd worden. Stel vast of er ook data over de verdeling naar voertuigcategorieën beschikbaar is.

## 4 Analysemethoden

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is gekeken naar de verschillende statistische analysemethoden die zijn toegepast in de IPL onderzoeken. In tabel 2 is per project de analysemethode kort samengevat. Daarin vallen overeenkomsten en verschillen tussen de projecten direct op. In de meeste studies is het effect bepaald door middel van orthogonale regressie. Daarnaast is gebruik gemaakt van een vergelijking tussen meting en model en is een analyse van gemiddelden toegepast. In paragraaf 4.2 worden de verschillende methoden verder besproken.

**Tabel 2**  
Overzicht analysemethoden

Naam	methode
Proeftuin Schermen	Orthogonale lineaire regressie van gemeten wegbijdragen op referentie- en maatregellocatie
Thomassentunnel	Analyse van gemiddelden van met NO <sub>x</sub> geschaalde fijn stof concentratietoename in de tunnel bij een aan- en uitgeschakeld systeem
Vegetatie Vaassen	Orthogonale lineaire regressie van gemeten wegbijdragen op referentie- en maatregellocatie Vergelijking van gemiddelde wegbijdrage op verschillende afstanden tot de weg
Vegetatie Valburg	Analyse van gemiddelde verhouding van de massaflux voor en achter de vegetatie
A73 Nijmegen	Orthogonale lineaire regressie van gemeten wegbijdragen op referentie- en maatregellocatie
Dynamax	NO <sub>x</sub> : orthogonale lineaire regressie van gemeten wegbijdragen op referentie- en maatregellocatie Fijn stof: lineaire regressie van gemeten en gemodelleerde wegbijdrage, waarbij model uitgaat van onveranderende emissies

### 4.2 Informatie

Bij het vaststellen van het effect worden vaak twee sets paren concentratiemetingen met elkaar vergeleken. Dit kan gebeuren met behulp van lineaire regressie of door het eenvoudig vergelijken van gemiddelden

#### 4.2.1

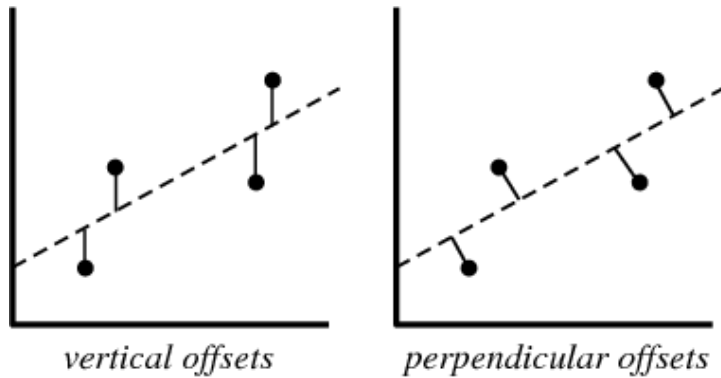
##### *Regressie*

Bij lineaire regressie wordt uitgegaan van een lineair verband tussen de ene set meetresultaten (x) en de andere (y). Het verband tussen de twee sets wordt uitgedrukt als een rechte lijn al dan niet door de oorsprong. Deze lijn van de vorm  $y=ax+b$  wordt dus beschreven aan de hand van de richtingscoëfficiënt a en het intercept b. Met behulp van de kleinste kwadraten methode wordt een best passende lijn door de getallen paren berekend. Er zijn twee typen lineaire regressie:

- Bij de standaard werkwijze (gewone lineaire regressie) wordt de lijn berekend ervan uitgaande dat er een onafhankelijk variabele x is (bijvoorbeeld de concentratie van een kalibratiegas) en een afhankelijk variabele y (de uitslag van een monitor). De onafhankelijke variabele heeft een verwaarloosbare spreiding.
- Bij orthogonale regressie wordt ervan uitgegaan dat x en y beide afhankelijke variabelen zijn. Het gaat dan bijvoorbeeld om de vergelijking van de uitslagen

van twee monitoren. Als de variabelen op de x- en y-as dezelfde grootteorde hebben, kan orthogonale regressie worden toegepast.

*Uitleg "gewone en orthogonale regressie"*



Bij gewone regressie (linker figuur) is de lijn zo geplaatst dat de verticale afstanden van de datapunten tot de lijn minimaal zijn.

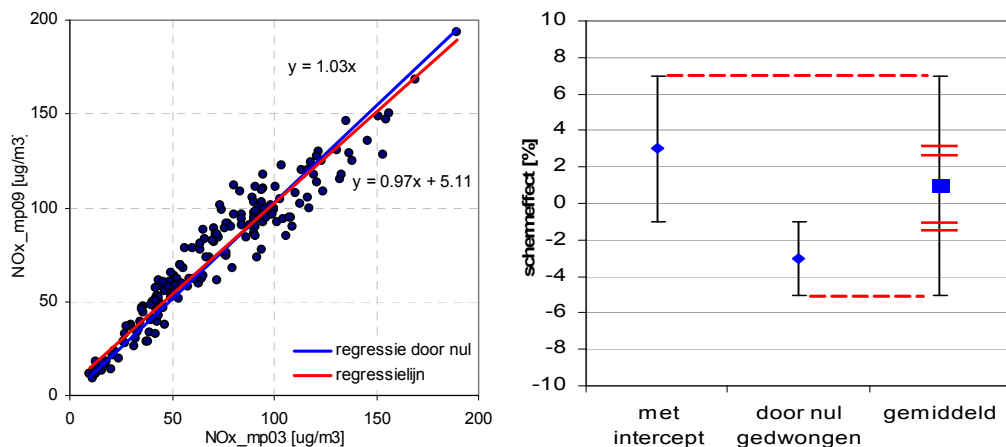
Bij orthogonale regressie (rechter figuur) is de lijn zo geplaatst dat de loodrechte afstanden van de datapunten tot de lijn minimaal zijn.

Intercepten zijn nuttig om systematische verschillen tussen datasets boven tafel te krijgen. Ze bemoeilijken echter de analyse van het verschil tussen de twee datasets, omdat er twee coëfficiënten zijn die van elkaar kunnen verschillen. Hier is in de IPL-studies als volgt mee omgegaan:

- Als het intercept niet significant van nul afwijkt (binnen  $2\sigma$  interval) wordt de regressie door de oorsprong geforceerd. De richtingscoëfficiënt en de onzekerheid daarin vormen de basis van de vergelijking.
- Als het intercept wel significant van nul afwijkt (buiten  $2\sigma$  interval) wordt zowel een regressie door de oorsprong als één met intercept gemaakt. De richtingscoëfficiënten van beide regressielijnen worden vervolgens gemiddeld. De "omhullende" onzekerheid (zie kader) van de richtingscoëfficiënten wordt in de analyse als onzekerheid meegenomen.

Voorbeeld "omhullende onzekerheid":

- als het intercept niet significant is wordt de regressielijn door nul gedwongen;
- als het intercept wel significant is wordt de gemiddelde richtingscoëfficiënt bepaald met een 'omhullende' onzekerheid.



In de figuur is een voorbeeld gegeven van een dataset waarop regressieanalyse is toegepast. Er is zowel een regressielijn met intercept (rood) als een door nul gedwongen lijn weergegeven (blauw). In dit voorbeeld is er sprake van een significant intercept en wordt op basis van de "gemiddelde" regressielijn het schermeffect bepaald (zie rechter figuur).

In de IPL studies waarbij gemeten concentraties op een referentie- en maatregellocaties met elkaar vergeleken worden, is gebruik gemaakt van orthogonale regressie omdat de metingen op beide locaties onzekerheden met zich meebrengen. Het effect van de maatregel is in deze IPL studies bepaald door een regressielijn te berekenen tussen de gemeten wegbijdrage op de maatregel- en de referentielocatie. De koppeling van de datapunten gebeurt op basis van tijd (gelijktijdig gemeten wegbijdragen). Het effect wordt gegeven door de afwijking van de richtingscoëfficiënt van 1 in procenten uit te drukken. De onzekerheid in het effect is gelijk aan de onzekerheid in de richtingscoëfficiënt. (eventueel aangevuld met andere geschatte onzekerheden)

In het Dynamax project wordt de maatregel voor fijn stof geëvalueerd met behulp van een model. In dat geval wordt een regressie gemaakt tussen de gemeten en gemodelleerde wegbijdragen voor zowel de maatregel-uren als de referentie-uren. Door in het model de emissiefactoren voor beide situaties gelijk te laten - de verkeersintensiteiten, -snelheden en -congestie veranderen wel - volgt uit de vergelijking tussen de richtingscoëfficiënten het effect van de maatregel (in %). De onzekerheid volgt uit de onzekerheden in de richtingscoëfficiënten. Bij de analyse wordt de regressie door de oorsprong geforceerd. Er wordt gebruik gemaakt van gewone lineaire regressie, waarbij de modelberekening als onafhankelijke variabele is gekozen.



#### 4.2.2 *Analyse van gemiddelden*

In het Thomassentunnel project is gebruik gemaakt van de analyse van gemiddelden. De verhoudingen tussen de concentratietoename van  $PM_{10}$  en van  $NO_x$  zijn gemiddeld voor alle intervallen mét maatregel en alle intervallen zónder maatregel. Uit het verschil tussen de gemiddelden volgt het effect in procenten. De onzekerheid volgt uit de standaarddeviatie rondom de gemiddelden.

Om uitbijters die een onevenredige invloed hebben op het resultaat uit te sluiten, zijn de gemiddelden bepaald over de intervallen die binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval rondom het gemiddelde van alle intervallen (dus inclusief uitbijters) liggen.

Dit voorbeeld is uitgewerkt in onderstaand kader.

In dit project had de verhouding tussen de concentratietoename van  $PM_{10}$  en van  $NO_x$  ook met behulp van lineaire regressie bepaald kunnen worden. De belangrijkste reden waarom in dit project niet gekozen is voor lineaire regressie is dat het bereik van  $PM_{10}$  sterk verschilt van dat van  $NO_x$  (tot ongeveer een factor 20). Dit heeft de volgende gevolgen:

- Orthogonale regressie is uitgesloten.
- Bij gewone lineaire regressie bleek dat de verschillen in de richtingscoëfficiënten van de regressie geforceerd door de oorsprong en die met intercept groot waren. Bovendien bleek dat de berekende regressielijnen voor de maatregel- en referentiesituatie niet alleen van richtingscoëfficiënt maar ook sterk van intercept verschilden. Met andere woorden: het bepalen van het effect op basis van alleen de richtingscoëfficiënten, zou geen recht hebben gedaan aan de werkelijkheid.

Daarnaast speelde mee dat het effect van het verhogen van het aantal datapunten lastig van tevoren te bepalen is, wat een nadeel was bij het opzetten en aanpassen van de meetstrategie.

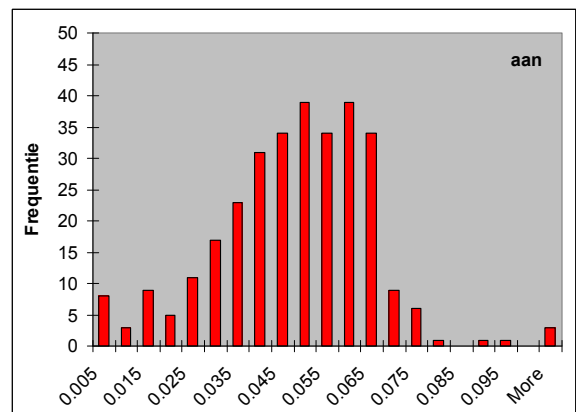
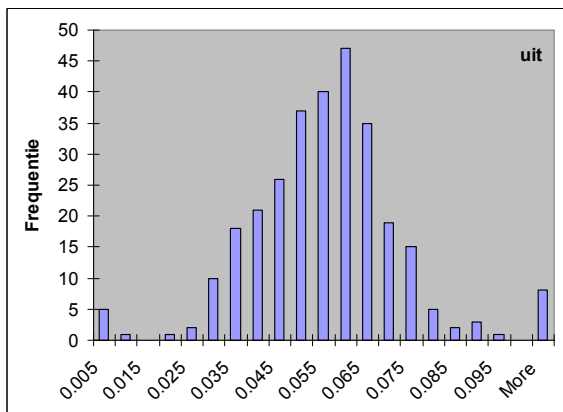
Voorbeeld "analyse van gemiddelden":

Het reductie-effect van het elektrostatisch concept in de Thomassentunnel volgt uit de verhouding van de gemiddelden  $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$  in *aan* en *uit* intervallen:

$$effect = \left( 1 - \frac{\text{gemiddelde} \left( \frac{\Delta PM}{\Delta NO_x} \right)_{aan}}{\text{gemiddelde} \left( \frac{\Delta PM}{\Delta NO_x} \right)_{uit}} \right) * 100\%$$

De toevallige onzekerheid in het effect (in %) wordt berekend uit de standaarddeviaties van de verhouding  $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$  van de *aan* en *uit* intervallen:

$$\sigma_{effect} = \sqrt{\frac{\sigma_{aan}^2}{n_{aan}} + \frac{\sigma_{uit}^2}{n_{uit}} \left( \frac{100\%}{\text{gemiddelde}_{uit}} \right)^2}$$



Bovenstaande figuren tonen de verdelingen van de verhouding  $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$  over de intervallen in Fase 2 van het project (links: uit intervallen, rechts: aan intervallen). Het valt op dat er enkele intervallen buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval liggen (aan de linker- en rechterkant van de verdeling). De intervallen die binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval liggen zijn gebruikt om het effect te bepalen:

Aantal <i>uit</i> intervallen	292
Aantal <i>aan</i> intervallen	306
Gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ <i>uit</i>	0.0527
Gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ <i>aan</i>	0.0449
<b>Gemiddeld effect (%)</b>	<b>14.7</b>

In het Valburg-project is het effect bepaald door voor en achter de vegetatie een massaflux te bepalen. De verhoudingen tussen de massafluxen zijn vervolgens gemiddeld. Het effect is niet op de gemiddelde maar op de mediane verhouding gebaseerd. Het is onduidelijk waarom daarvoor gekozen is.

### 4.3 Evaluatie

Uit de evaluatie van de ervaringen in de projecten komen een aantal aandachtspunten en aanbevelingen naar voren die hieronder besproken worden.

*Gebruik zowel regressieanalyse als analyse van gemiddelden om beter begrip te krijgen van de data.*

Regressie en analyse van gemiddelden zijn veel gebruikte analysemethoden om het effect van maatregelen vast te stellen. Analyse van gemiddelden is een simpelere methode dan regressie, omdat het op één manier uitgevoerd wordt. Bij regressie zijn er verschillende mogelijkheden (door oorsprong of met intercept; gewoon of orthogonaal). Deze nuances kunnen helpen het inzicht in de data te vergroten.

De bruikbaarheid van de methoden hangt af van de opzet van proef en de verkregen dataset. Door in een studie beide methoden naast elkaar te gebruiken, wordt optimaal begrip verkregen van de meetdata: voldoen de meetdata aan de (theoretische) verwachting, zijn er systematische meetfouten, hoe groot is de spreiding (toevallige fout) in de data? De keuze voor de methode die uiteindelijk voor de data analyse gebruikt gaat worden, kan daarna gebaseerd worden op de data zelf.

Regressie kan de volgende inzichten opleveren:

- De intercepten geven een indicatie voor systematische meetfouten
- Identificatie van uitbijters die een onevenredige invloed op de regressie hebben. De uitbijters vallen in een regressieplaatje op door de afstand die ze hebben tot de regressielijn. Het gebruik van een tool waarbij deze uitbijters verwijderd kunnen worden biedt inzicht in de mate waarmee deze uitbijters de regressiecoëfficiënten en de onzekerheden erin beïnvloeden (bijvoorbeeld de Multi Regression Analyser, RIVM 2009, zie voorbeeldkader)
- Er kan onderzocht worden of het verband tussen de x- en y-variabele lineair is.

Analyse van gemiddelden kan de volgende inzichten opleveren:

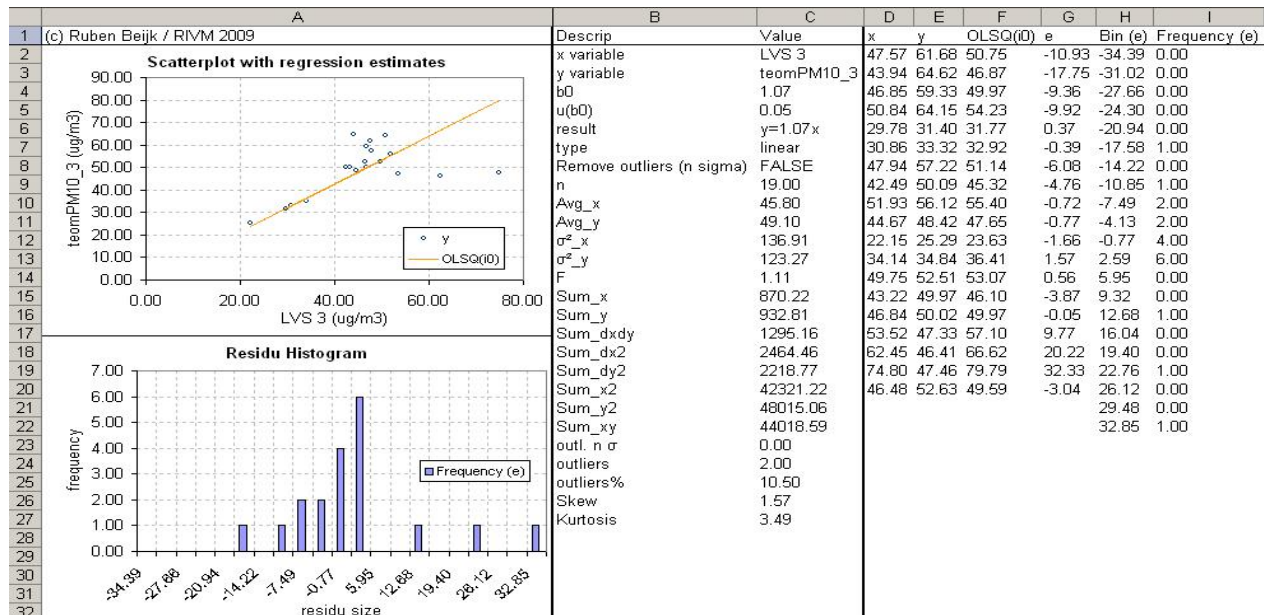
- Bij het opstellen van de meetstrategie moet geschat worden hoeveel meetdata er nodig zijn om een significant verschil tussen maatregel- en referentiesituatie te bepalen. Met behulp van de Student t-toets kan de minimale grootte van de steekproef geschat worden. De toets bepaalt uit bekende standaarddeviaties in de metingen wat de kans is dat de gemiddelden significant van elkaar afwijken bij een bepaald aantal metingen. Bij aanpassing tijdens een meetcampagne kunnen daarvoor de meetdata van de periode ervoor gebruikt worden. Dit is bijvoorbeeld bij de proef van de Thomassentunnel gedaan (zie kader over Student t-toets hierna).

- Met behulp van frequentieverdelingen (histogrammen) kan visueel getoetst worden of de meetdata normaal verdeeld is en of er uitbijters zijn die een onevenredige invloed hebben op het gemiddelde. Hiervoor zijn ook statistische toetsen beschikbaar. Beïnvloeding van de verdeling door de maatregel kan inzicht bieden in de werking van de maatregel.
- Uitbijters kunnen gemakkelijk verwijderd worden door de meetdata te beperken tot een bepaald betrouwbaarheidsinterval (bijvoorbeeld het 95% betrouwbaarheidsinterval).

Voorbeeld "Multi Regression Analyser, RIVM 2009":

De Excel tool bestaat uit een datasheet (sourcesheet), een sheet waarin je queries kunt aanmaken (bovenste figuur) met keuzemogelijkheden voor type regressie, behandeling van uitbijters en variabelen voor de residu-analyse. De resultaten komen in een result sheet te staan (onderste figuur).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>sourcesheet</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>regtype</b>	<b>outliers</b>	<b>constraint</b>	<b>value</b>	<b>res_par</b>
	Sheetname where regression source data is located	Column (label) on data_sheet where x values are stored	Column (label) on data_sheet where y values are stored	Choose for which regression method you want to perform residu analysis	Remove outliers or not? Value must be FALSE or an integer indicated the n <sup>th</sup> sigma	Column (label) on sourcesheet where the constraint for data selection is located. The constraint value is the actual filter criteria. As a pair, these columns may be repeated numerous times. The ! (NOT) and   (OR) operators are allowed to precede constraint value.		Data used for residu analysis. Add the appropriate column headername to be found on
2	Run regression queries		Help					
3								
4	lvs_12h	LVS 3	teomPM10	OLSQ(0)	FALSE	TEOM3 aan	TRUE	
5	lvs_12h	LVS 3	teomPM10	OLSQ(0)	2	TEOM3 aan	TRUE	
6								



*Voorbeeld "Student t-toets":*

Met de Student t-toets kan onderzocht worden of de gemiddelden van 2 datasets significant van elkaar verschillen. Dat hangt af van de spreiding in de datasets (standaarddeviatie), het aantal datapunten in de dataset en het gekozen betrouwbaarheidsinterval.

Bij het bepalen van het aantal benodigde metingen kan de kans op significantie vooraf geschat worden als de verwachte spreiding in de metingen bekend is. Halverwege de proef in de Thomassentunnel is de Student t-toets gebruikt om te bepalen of het mogelijk zou zijn om de analyse te baseren op LVS-metingen. Voor het 95% betrouwbaarheidsinterval werden de volgende kansen op significantie berekend:

werkelijke verschil	aantal dagen per handeling			
	10	15	20	25
5	0.32	0.43	0.52	0.60
7.5	0.56	0.72	0.82	0.90
10	0.77	0.90	0.96	0.99
12.5	0.91	0.98	0.99	0.99

*Baseer de keuze van de analysemethode op de verkregen inzichten.*

Regressie wordt in de volgende gevallen verkozen boven de analyse van gemiddelden:

- Wanneer er intercepten zijn waarvan is vastgesteld dat ze het gevolg zijn van systematische meetfouten, zal regressie waarschijnlijk een meer representatieve schatting van het effect opleveren wanneer gebruik gemaakt wordt van de richtingscoëfficiënt van de lijn met intercept. De methode waarvoor in de IPL studies gekozen is (het middelen van de richtingscoëfficiënten van de lijnen met en zonder intercept) geeft niet het exacte resultaat en een grote onzekerheidsmarge.

De berekende fout in de berekende helling geeft soms niet een goed beeld van de werkelijke onzekerheid. Dit kan gebeuren wanneer er twee clusters van punten zijn. De berekende lijn heeft dan een onzekerheid die overeenkomt met een onzekerheid van een lijn door twee punten. Voorwaarde voor het gebruik van lineaire regressie is dan ook dat de puntenwolk evenredig over de lijn is verdeeld.

Analyse van gemiddelden wordt in de volgende gevallen verkozen boven regressie:

- Wanneer de koppeling van datapunten niet vanzelfsprekend is (bijvoorbeeld wanneer er geen gelijktijdige metingen zijn).
- Wanneer de x- en y-variabele een andere grootteorde hebben

*Gebruik een luchtkwaliteitmodel wanneer er geen bruikbare data van een referentielocatie beschikbaar zijn.*

Berekeningen met een luchtkwaliteitmodel kunnen uitkomst bieden voor het bepalen van het effect van maatregelen als:

- er maar op één locatie gemeten kan worden waarbij de maatregel discontinu wordt ingezet

- er grote verschillen en daarmee gepaard gaande onzekerheden blijken te zijn tussen de referentie- en maatregellocatie.  
Het is dan wel nodig om actuele metingen van verkeer en meteorologie uit te voeren. Anders kunnen verschillen in verkeer ten onrechte voor een effect aangezien worden (of tegengesteld: zorgen voor een onderschatting van het effect).

- Les 16: Gebruik zowel regressieanalyse als analyse van gemiddelden om beter begrip te krijgen van de data.
- Les 17: Verkies regressie boven analyse van gemiddelden wanneer er intercepten zijn waarvan is vastgesteld dat ze het gevolg zijn van systematische meetfouten. Ga dan uit van de helling van de regressielijn met intercept.
- Les 18: Orthogonale regressie kan niet toegepast worden wanneer de variabelen op de x- en y-as een andere orde van grootte hebben.
- Les 19: Verkies analyse van gemiddelden boven regressie wanneer:
- de koppeling van datapunten niet vanzelfsprekend is (bijvoorbeeld wanneer er geen gelijktijdige metingen zijn).
  - de x- en y-variabele een andere grootteorde hebben
- Les 20: Gebruik een luchtkwaliteitmodel wanneer er geen bruikbare data van een referentielocatie beschikbaar zijn.

## 5 Onzekerheden

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is gekeken naar de onzekerheden die bij de verschillende meetonderzoeken relevant bleken. Er wordt ingegaan op de verschillende vormen van onzekerheid en de manier waarop ermee is omgegaan.

### 5.2 Informatie

Voor een correcte interpretatie van (meet)resultaten is inzicht in onzekerheden van groot belang. Een opvallend verschil tussen de "grotere projecten" zoals die voor dit rapport bekeken zijn en de "kleinere experimenten" is dat de onzekerheidsparagraaf bij de kleinere experimenten afwezig is, dan wel dat slechts "toevallige fouten" (spreiding in data) als bron van onzekerheid is opgenomen.

Bij de "grotere projecten" blijkt in elk onderzoek dat er serieuze onzekerheden zijn die het trekken van eenvoudige conclusies bemoeilijkt. Opvallend is dat elk onderzoek op een eigen wijze de onzekerheidsanalyse invult. De meest uitgebreide analyse van onzekerheden is te vinden in de rapportages van de proeftuin. Elk project vergt ook een eigen aanpak, omdat de meet- en analysemethode verschilt.

In de eindresultaten van het meetonderzoek "proeftuin schermen" is een schatting opgenomen van de totale onzekerheid. Deze is opgebouwd uit verschillende deelonzekerheden als gevolg van:

- verschillen tussen de meetapparaten als gevolg van ijking of drift;
- "toevallige" meetfouten;
- verschillen in omgeving tussen de meetlocaties (structuur).

De totale onzekerheid wordt bepaald door relevante onzekerheden kwadratisch op te tellen.

De invloed van de onzekerheid op het eindresultaat blijkt sterk afhankelijk van de concentraties die gemeten zijn. In de proeftuin schermen is bijvoorbeeld voor TEOM's een "between sampler" onzekerheid gevonden van een ½ à 1 µg. Dit is absoluut gezien niet veel maar als bijvoorbeeld wegbijdrages van 4 µg worden gemeten is de onzekerheid in een meting 25%.

De gevonden "in between sampler" onzekerheid van een NO<sub>x</sub> meting met een Airpointer in de Proeftuin Schermen blijkt ongeveer 2 µg te zijn. Op een gemiddelde gemeten wegbijdrage van 100 µg speelt deze "apparatuurgerelateerde onzekerheid" dus een veel kleinere rol dan bij het voorbeeld van de TEOM.



Het project Thomassentunnel is het enige project waarin de bepaling van het effect is gebaseerd op een vergelijking tussen referentie- en maatregelsituatie in de tijd (i.p.v. in de ruimte). Dat heeft gevolgen voor de analyse van de onzekerheid. Omdat er een vergelijking gemaakt wordt tussen de met regelmaat afwisselende maatregel- en referentiesituaties (elektrostatisch veld aan en uit), valt de apparatuuronzekerheid hier weg. Er wordt immers met dezelfde apparaten gemeten in de maatregel- en referentiesituatie. Bij deze proef is onderzoek gedaan naar de onzekerheid in de analyse als gevolg van mogelijke beïnvloeding van metingen door het elektrostatische veld op basis van een vergelijking tussen de TEOM en LVS bij een werkend en niet werkend elektrostatisch concept. De meetperiode waarin de vergelijking uitgevoerd is was echter erg kort. Het waargenomen verschil week, mede daardoor, niet significant van nul af.

Op dit moment wordt nog onderzocht hoe hiermee om te gaan in de onzekerheid in de analyse.

In het onderzoek A50 Valburg is het krijgen van inzicht in onzekerheden veel complexer door de combinatie van meerdere meetmethoden (instrumenten) met modelonderzoek.

### **5.3 Evaluatie**

Op het gebied van onzekerheden komen we tot de volgende leerpunten/aanbevelingen:

- De toevallige (of willekeurige) onzekerheid blijkt in de praktijk niet altijd de grootste bron van onzekerheid te zijn. Onzekerheid als gevolg van verschillen tussen meetapparatuur (between sampler) en verschillen tussen meetlocaties blijken vaak van grotere invloed op de totale onzekerheid. Het gevolg van de methode waarbij onzekerheden kwadratisch worden opgeteld is dat grote onzekerheden relatief zwaar meewegen. Kleine onzekerheden zijn al snel niet relevant. Belangrijk is daarom dat alle relevante onzekerheden geschat worden.
- Tussen de IPL projecten zijn verschillen gevonden in aanpak en diepte met betrekking tot het inschatten van onzekerheden vooraf en het in rekening brengen van onzekerheden in de resultaten achteraf. In de grotere projecten wordt meer aandacht gegeven aan onzekerheden dan bij kleine projecten. Een goede analyse vooraf maakt het mogelijk in te schatten hoe lang er gemeten moet worden om effecten met voldoende zekerheid in te kunnen schatten.
- Een belangrijke les die geleerd moet worden is dat bij de keuze van apparatuur goed naar de verwachte concentraties en concentratieverschillen gekeken moet worden en met welke apparatuur deze met voldoende zekerheid gemeten kunnen worden (bijvoorbeeld PM wegbijdragemetingen met een Osiris; in het Dynamax en Wijkertunnelproject zijn Osiris instrumenten in duplo ingezet waardoor de nauwkeurigheid van de resultaten kon worden vergroot).

- Gezien het effect van onzekerheden op de betrouwbaarheid van de resultaten is het van belang altijd een goede onzekerheidsanalyse op te nemen. Onduidelijk is in hoeverre vooraf in een meetplan of bij de voorbereiding van een offerte-uitvraag voldoende rekenschap is gegeven van de onzekerheden. Dit geldt in zekere mate ook voor de gekozen meetmethode. Een goede inschatting van onzekerheden kan helpen een meetmethode te kiezen die bij bepaalde onzekerheden voldoende significante meetresultaten oplevert. Vooraf kan (bijvoorbeeld met de GUM methode) een inschatting gemaakt worden van de totale meetonzekerheid. Achteraf kan de werkelijke onzekerheid geschat worden door de apparatuur onderling te vergelijken.

Les 21: Verschillen tussen apparatuur en verschillen tussen de meetlocaties blijken vaak de grootste bron van onzekerheid.

Les 22: Er is binnen de projecten op verschillende niveaus met onzekerheden omgegaan. Voor toekomstige projecten wordt aanbevolen van deze inzichten gebruik te maken.

Les 23: Bij de keuze van apparatuur eerst een goede inschatting van de verwachte concentraties maken om vast te stellen aan welke eisen apparatuur moet voldoen (wegbijdrage).

Les 24: In het meetplan dient men altijd een onzekerheidsanalyse op te nemen waarin tenminste moet worden ingegaan op apparatuuronzekerheid, toevallige fouten (statistische spreiding) en meetpositie onzekerheid (in geval van verschilmetingen met meerdere meetlocaties)

## 6 Praktijk en kwaliteitsborging

### 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is gekeken naar de praktijkaspecten die tijdens de verschillende meetonderzoeken relevant bleken voor de metingen. Op praktisch gebied zijn aspecten beschouwd als infrastructuur van meetpunten, risico's en kwaliteitsborging.

### 6.2 Informatie

#### *Infrastructuur*

Bij de meeste projecten zijn in het meetplan eisen gesteld aan de infrastructuur van de meetpunten. De belangrijkste zijn bouwtechnische aspecten (montage op stevig oppervlak of aan een paal, Rekening houden met windbelasting) en stroomvoorziening (continu voldoende vermogen). In een enkel geval (Proeftuin Schermen) is vooraf rekening gehouden met de kans op diefstal en vandalisme wat heeft geleid tot voorzorgsmaatregelen in de vorm van hekken en camerabewaking.

Wegbeheerders hebben bij enkele projecten aanvullende eisen ten aanzien van de inrichting van de meetpunten gesteld. Deze eisen hadden betrekking op verkeersveiligheidszaken als een "opstelling buiten de obstakelvrije zone" (o.a. Proeftuin schermen, CaCl<sub>2</sub> en Valburg) en de "camouflage" van de meetpunten (Thomassentunnel).

#### *Omgeving*

De invloed van stoorbronnen, bosjes en ruimtelijke ligging (hoogteverschillen) zijn van tevoren lastig in te schatten. Verschillen in de omgeving tussen de meetpunten blijken daardoor in de praktijk groter dan gedacht. De consequenties voor het meetonderzoek zijn groot als blijkt dat achtergrondpunten niet voor alle meetlocaties representatief zijn of dat metingen gehinderd worden door stoorbronnen (zie ook hoofdstuk 2). In de proeftuin schermen bleek uit een vergelijking tussen twee meetlijnen dat de lokale verschillen tussen de meetlijnen tot een forse extra onzekerheid hebben geleid.

#### *Bereikbaarheid*

Niet alle meetlocaties bleken tijdens het onderzoek even goed toegankelijk voor onderhoud of reparatie. Naast fysieke bereikbaarheid (verkeerstellers boven de weg) heeft (lokale) regelgeving tot beperkingen geleid. Deze bleken sterk per locatie te verschillen:

- Om veilig te kunnen werken, is voor ieder onderhoud aan apparatuur in de Thomassentunnel een wegafsluiting ingepland;
- Werkzaamheden aan apparatuur in het Dynamax-project dienden een week van tevoren te worden aangevraagd;

Meetlocaties in de Proeftuin schermen waren grotendeels op grotere afstand van de snelweg en konden, zonder melding, op ieder gewenst moment bezocht worden.

### **Figuur 5**

De best beschikbare meetlocatie is niet altijd de meest optimale meetlocatie



#### *Kwaliteitsborging*

De kwaliteit van de meetgegevens is onder andere afhankelijk van de meetapparatuur en de manier waarop met de apparatuur is omgegaan. In alle projecten zijn kalibraties en verificaties uitgevoerd volgens een vooraf vastgesteld protocol. Dit protocol vormt samen met het "apparatuurlogboek" een goede basis voor de interpretatie van de meetgegevens. Het belang van het logboek is groot wanneer zich (apparatuur gerelateerde) incidenten voordoen. Als gevolg van vaste intervallen tussen onderhoudsmomenten kan het gebeuren dat apparatuur langere tijd geen goede meetgegevens verzamelt.

Dataverlies als gevolg van apparatuurproblemen kon in een aantal projecten worden beperkt dankzij de mogelijkheid dagelijks "online" de status van de apparatuur te controleren en de data extern op te slaan.

Het vaststellen van onderlinge verschillen tussen apparatuur geeft extra inzicht in de kwaliteit van de apparatuur. In de proeftuin schermen was het mogelijk bij een bepaalde windrichting op alle meetpunten achtergrondconcentraties te meten en daarmee gedurende het project de onderlinge verschillen te monitoren. In een aantal projecten waar deze mogelijkheid niet voorhanden was, is aansluitend aan het meetonderzoek een apparatuurvergelijking uitgevoerd door de apparatuur gedurende enkele dagen naast elkaar te plaatsen.

Om voor fijn stof meer inzicht te krijgen in de mogelijkheden van de verschillende meetinstrumenten voor PM, wordt aanbevolen om in een project een vergelijking te doen van de besproken meetinstrumenten. Aansluitend aan het CaCl<sub>2</sub>-onderzoek op de A73 bij Nijmegen is daarom een experiment ter vergelijking van de apparatuur uitgevoerd. De in IPL-onderzoek meest gebruikte fijn-stofapparatuur is vergeleken (TEOM, Grimm, Osiris, LVS). De resultaten zullen in een afzonderlijke rapportage worden opgenomen ("Vergelijk veel gebruikte fijn stof apparatuur in IPL-projecten", M+P-rapport DVS.08.06.8).

### **6.3**

#### **Evaluatie**

In de IPL projecten zijn de meetlocaties in overleg met (locale) wegbeheerders bepaald. Dit heeft geleid tot verkeersveilige meetposities. Daarnaast zijn er geen noemenswaardige gevallen van vandalisme of diefstal bekend. De ervaring langs snelwegen is dat "grijze kastjes" met rust gelaten worden. In de proeftuin schermen

stonden de meetpunten meer uit het zicht en daarmee op een risicovollere locatie. De getroffen veiligheidsmaatregelen (hekwerk en cameratoezicht) bleken voldoende om vandalisme of diefstal te voorkomen.

Het verzorgen van stroomvoorziening is bij alle projecten lastig en kostbaar gebleken. Bestaande infrastructuur kon of mocht vaak niet gebruikt worden. In projecten met een langere doorlooptijd zoals de Proeftuin Schermen en A58 Dynamax is over grote afstand bekabeling aangelegd. In projecten met een kortere doorlooptijd als A73 Nijmegen en A50 Vaassen is gebruik gemaakt van een aggregaat. In het Dynamax project zorgde uitval van stroom ervoor dat externen af en toe op locatie de stroom moesten herstellen. Naast verlies van meetdata brengt dit ook kosten met zich mee. Waarschijnlijk heeft de uitval te maken met overbelasting.

De opstartfase na plaatsen van de apparatuur blijkt in de praktijk vaak enkele problemen op te leveren. Neem hiervoor voldoende tijd.

In projecten waar slechts op beperkte momenten onderhoud of reparaties uitgevoerd konden worden, is daardoor in enkele gevallen langere tijd geen data verzameld. Onduidelijkheden in de aanvraag van "meldwerknummers" heeft bij het A58 Dynamax onderzoek regelmatig tot uitstel van onderhoud of reparaties geleid.

- |   |
|---|
| <p>Les 26: De praktijk geeft soms aanleiding tot aanpassing van het oorspronkelijke meetplan.</p> <p>Les 27: De inregelperiode neemt vaak meer tijd in beslag dan vooraf ingeschat.</p> <p>Les 28: Houd bij het maken van de planning rekening met onvoorziene omstandigheden door, met name aan het begin, voldoende tijd in te ruimen.</p> <p>Les 29: In projecten waar geen vaste aansluiting voor stroomvoorziening mogelijk is, blijkt het gebruik van een aggregaat, mits op de juiste plek geplaatst, een bruikbaar alternatief (windafwaarts, voldoende afstand).</p> <p>Les 30: Maak duidelijke afspraken met de wegbeheerder over de procedure van het plegen van onderhoud.</p> <p>Les 31: Zorg dat de meetwaarden steeds snel beschikbaar komen. Op die manier heb je meer grip op storingen en kan de analyse snel uitgevoerd worden. Dit kan bijvoorbeeld door de data dagelijks op een externe database op te slaan.</p> |
|---|

## 7 Discussie en conclusies

In het voorafgaande zijn de ervaringen uitgesplitst naar verschillende onderdelen van de werkzaamheden besproken. Hieronder wordt ingegaan op wat meer algemene kanten van de onderzoeken in de vorm van een aantal aanbevelingen.

- Kies een meetopzet waarbij de grootste onzekerheden al wegvallen  
De discussie over onzekerheden bloeit vaak op aan het einde van de analyse van de meetgegevens. Het verdient de aanbeveling bij de opzet van meetcampagnes met deze onzekerheden rekening te houden. Het gaat daarbij niet om de standaard kwaliteit aspecten zoals kalibraties van meetapparatuur. Uiteraard verdienen deze aandacht. Bij complexere projecten zoals de proeftuin of de Thomassentunnel wordt het uiterste van apparatuur gevraagd. Het eindresultaat van het experiment wordt bijvoorbeeld bepaald door het verschil tussen concentraties gemeten met twee verschillende apparaten. Het gaat daardoor vaak om verschillen die met de gebruikte apparatuur nauwelijks meetbaar zijn. Het is niet mogelijk de apparatuur zodanig te kalibreren dat de nauwkeurigheid van de verschilmetingen voldoende is. Het verdient daardoor aanbeveling te werken met een methode waarbij deze kalibratie intrinsiek aanwezig is of niet nodig. Voorbeelden van deze meetopzet zijn:
  - o het gebruik van een kleppensysteem met leidingen zodat één (1) monitor wordt gebruikt voor het bepalen van kleine verschillen. Problemen die dan wel kunnen optreden zijn door verschillen in de lengte van de leiding waardoor leidingverliezen en omzettingen belangrijk kunnen worden. Het voordeel van het gebruik van 1 monitor is echter bijzonder groot. Een dergelijk systeem is ingezet bij de vegetatie-experimenten.
  - o Het gebruik van een interne tracer. Deze methode is toegepast in de Thomassentunnel. Om het effect van het elektrostatisch concept vast te stellen moet de toename van de concentratie fijn stof onderzocht worden bij een niet werkend en een werkend systeem. De twee meetperioden moeten worden vergeleken. Het ventilatievoud en de emissies zijn niet noodzakelijkerwijs gedurende die perioden gelijk hetgeen de interpretatie bemoeilijkt. Door het gebruik van een interne tracer (NO<sub>x</sub>) is het mogelijk allerlei complexe correcties voor het verloop van deze parameters te vermijden.
  - o Kies een goed middelingsinterval. Ook deze methode is gebruikt in de Thomassentunnel. Belangrijke parameters zoals fluctueren van emissies en ventilatievoud variëren op een tijdschaal van uren. Wanneer een middelingsinterval wordt gekozen dat veel korter is dan een uur dan wordt het effect van de fluctuerende parameters op de meting weg gefilterd. In het geval van het experiment in de Thomassentunnel werd uiteindelijk om andere redenen besloten de middelingstijd langer te kiezen.
- Zorg voor voortdurende vergelijking met referentieapparatuur
  - o Voor veel toepassingen is een hogere tijdsresolutie nodig dan het 24 uur-gemiddelde van de referentiemethode voor fijn stof (LVS). Daardoor wordt gebruik gemaakt van niet-referentieapparatuur zoals de TEOM en de Osiris. Het verdient aanbeveling de meetresultaten van deze apparatuur steeds te blijven vergelijken met de LVS. Gebleken is dat de niet-referentieapparatuur nogal eens onverwachte respons geeft. Vergelijking met de LVS maakt

- uitspraken over het functioneren van deze apparatuur, zij het op een andere tijdschaal, altijd mogelijk
- Zorg voor een snelle complete analyse van de meetresultaten
    - o In het IPL onderzoek is vaak ingegrepen in de meetopzet op basis van eerste analyse van de resultaten. Dit was nogal eens om slecht presterende monitoren van fijn stof te vervangen door een TEOM. Bij de Thomassentunnel en de proeftuin waren de ingrepen noodzakelijk en succesvol. Een complete analyse van de eerste meetresultaten maakt het mogelijk de ingrepen te doen op basis van een compleet inzicht. Aanbevolen wordt om een dergelijke analyse zo snel mogelijk te doen. Zelfs op basis van onvolledige data. Dat maakt het mogelijk in te grijpen in primaire meetprocessen maar ook in secundaire zoals metingen gericht op het vaststellen van de onzekerheid.
  - Maak vooraf een inschatting van de benodigde duur van de meetcampagne. Over de duur van de meetcampagne kan vanuit verschillende invalshoeken iets gezegd worden:
    - o Methodiek: als er sprake is van het bepalen van de wegbijdrage, wordt de bruikbare dataset beperkt door de windrichting. Door een weg te kiezen met een noord-zuid oriëntatie is de kans dat uurgemiddelde metingen in de analyse meegenomen kunnen worden het grootst, omdat de windrichting in Nederland meest westelijk is. Als de proef gericht is op het verminderen van het aantal overschrijdingsdagen, dan heeft is een noord-zuid oriëntatie ook bevorderlijk voor de dataset omdat overschrijdingsdagen in Nederland vaak voorkomen bij oostenwind.
    - o Onzekerheid: hoe groter de onzekerheid in een meting, hoe meer metingen er nodig zijn om een betrouwbaar gemiddelde te krijgen. Bij verschilmetingen geldt dat ook: hoe groter de onzekerheid in een enkele meting, hoe meer metingen er nodig zijn om een verschil tussen twee meetpunten significant vast te stellen. Voorafgaand aan een campagne kan op basis van een schatting van de spreiding in meetwaarden statistisch bepaald worden hoeveel metingen er nodig zijn om met voldoende zekerheid een verwacht verschil vast te stellen (met de Student t-toets, zie hoofdstuk 4). De schatting van de spreiding in een gemiddelde concentratie kan gebaseerd worden op eerdere onderzoeken met dezelfde apparatuur. Het verwachte effect moet ook geschat kunnen worden.
    - o Externe omstandigheden: naast windrichting spelen omstandigheden als windsnelheid, neerslag, mist, het al dan niet in kunnen stellen van de maatregel en uitval van apparatuur een rol bij de hoeveelheid meetdata die uiteindelijk beschikbaar is voor analyse. Omdat deze invloeden vooraf moeilijk in te schatten zijn, is het belangrijk om de benodigde meetduur - indien mogelijk - ruim te nemen.
    - o Praktijk: het inregelen van de apparatuur neemt vaak meer tijd in beslag dan vooraf ingeschat. Er moet tijd ingepland worden aan het begin van de campagne voor een zogenaamde Fase 0, waarin zaken als apparatuur stabiliteit, data-acquisitie en andere praktische zaken worden getest.
    - o Representativiteit: door de seizoensvariatie in meteorologische omstandigheden, verkeer en concentraties van fijn stof en NO<sub>x</sub> speelt de vraag van representativiteit van meetperiode voor een jaargemiddelde situatie. Dit zou ervoor pleiten om een meetcampagne een vol jaar te laten duren. Als dat niet mogelijk is, wordt aanbevolen om de proef verspreid over het jaar minimaal tweemaal uit te voeren (bijvoorbeeld in de zomer en winter).

- o Bij veel meetcampagnes van het IPL is de duur van de meetcampagne achteraf als te kort ervaren. Bij meerdere projecten zijn verlengingen doorgevoerd.
- o Gezien de lengtes van de meetcampagnes die in dit rapport zijn behandeld (zie de tabel in hoofdstuk 1) lijkt het weinig zinvol om een meetcampagne korter dan 3 maanden op te zetten. Zelfs in proeven die 6 maanden duurden bleek het niet altijd mogelijk om voldoende meeturen te krijgen. Het wordt dan ook aanbevolen om meetcampagnes minstens 6 maanden te laten duren, eventueel in vorm van twee meetcampagnes tijdens verschillende seizoenen.
- o Is de maatregel gericht op overschrijdingsdagen (zoals bij Dynamax) dan wordt aanbevolen om een heel jaar te meten of de meetperiode rondom het winterseizoen te laten plaatsvinden.



## Conclusies

Hoewel sommige mensen beweren dat alleen door middel van metingen de 'echte waarden' vast worden gesteld, hebben windtunnelonderzoek, CFD-berekeningen en het meten in praktijksituaties allemaal hun eigen mogelijkheden en beperkingen. Hieronder wordt dit verder uitgewerkt.

### Toepasbaarheid

#### *CFD-berekeningen*

Op dit moment zijn CFD-berekeningen goed in staat om een beschrijving te geven van luchtstromingen op kleine schaal, maar het rekening houden met de meteorologie van de buitenlucht is (op dit moment nog) te complex. Hierdoor zijn luchtkwaliteitsberekeningen op dit moment nog niet erg betrouwbaar. Het is duidelijk dat CFD nog sterk in ontwikkeling is, waardoor het te verwachten is dat de mogelijkheden van CFD in de toekomst zullen toenemen. Vergelijkingen van verschillende varianten, waarbij het gaat om kwalitatieve verschillen en interpolaties in situaties waar ijkpunten zijn, leveren op dit moment al minder problemen op. CFD levert relatief snel voor een heel groot aantal waarneempunten een overzicht op. Ook het doorrekenen van nog niet bestaande varianten en het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses kunnen snel worden uitgevoerd. CFD-berekeningen zijn goedkoper dan uitgebreide meetcampagnes met actieve apparatuur.

#### *Windtunnelonderzoek*

Windtunnelonderzoeken zijn al wat verder ontwikkeld dan CFD-berekeningen, waardoor windtunnelonderzoek inmiddels een geaccepteerde methode van onderzoek naar de luchtkwaliteit is. Ook hierbij moet zich men bedenken dat het aantal verschillende meteorologische situaties beperkt is. Zo kan men allen onderzoek doen aan een neutrale atmosfeer en bijvoorbeeld geen rekening houden met een bijzondere temperatuursopbouw (bijvoorbeeld een inverse). Door de modellen slim op te bouwen, is het doormeten van verschillende varianten en toekomstige situaties relatief eenvoudig uit te voeren. Onderzoek met de windtunnel is goedkoper dan een uitgebreide meetcampagne met actieve apparatuur.

#### *Praktijkmetingen*

Uiteraard kunnen praktijkmetingen alleen gebruikt worden in situaties waar ook een praktijksituatie beschikbaar is. Dat wil zeggen dat toekomstige situaties/scenario's altijd op een andere manier zullen moeten worden bepaald. Hetzelfde geldt voor het bepalen van nog niet bestaande varianten.

Men dient zich te realiseren dat bij praktijkmetingen het altijd een momentopname is. Door de meetperiode te verlengen kan men het bezwaar hiervan verminderen. Daarnaast zegt de meting alleen iets over de specifieke locatie waar de metingen zijn uitgevoerd. Het toepasbaar verklaren op andere locaties en zelfs extra- en interpolatie zijn hachelijk. Door op meerdere locaties te meten kan men een idee krijgen in hoeverre de meetresultaten generaliseerbaar zijn. Zowel het verlengen van de meetduur als het uitbreiden van het aantal meetpunten en -locaties zorgen uiteraard voor hogere kosten.

In dit rapport worden alleen praktijkmetingen beschreven die uitgaan van actieve monsternamen. Dit is een relatief kostbare onderzoeksmethode die aan te bevelen is wanneer in complexe situaties inzicht gegeven moet worden in het verloop van processen in de tijd of bij bepaalde meteorologische omstandigheden. Een geheel andere methode is het gebruik maken van monsternamenbuisjes die passief monsters nemen (Palmerbuisjes). Hierbij hangt men monsternamenbuisjes voor een langere periode op. Het voordeel is dat zij aanmerkelijk goedkoper zijn dan de actieve monsternamenapparatuur. Voor het onderzoek naar maatregelen zoals dat binnen het IPL werd uitgevoerd, is een belangrijk nadeel dat het een gemiddelde is van alle waarden (tijd, weersomstandigheden, verkeersintensiteiten etc.). In sommige andere gevallen hoeft dit echter geen nadeel te zijn. Vanwege het reduceren van de onnauwkeurigheid hangt men de buisjes vaak met meerdere tegelijk op elk meetpunt.

#### Juridische status

Bij praktijkmetingen dient men gebruik te maken van voor het specifieke onderzoek voldoende betrouwbare apparatuur. Voor vergelijking van meetresultaten met grenswaarden moet de apparatuur voldoen aan de eisen van de Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit (RBL).

CFD-berekeningen hebben geen juridische status en kunnen daarom alleen gebruikt worden als aanvulling op wel goedgekeurde methoden. Dit zou bijvoorbeeld kunnen zijn om een interpolatie te doen of een visualisatie te maken van anderszins goedgekeurde resultaten.

De Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit (RBL) geeft de mogelijkheid om de resultaten vanuit door VROM goedgekeurde windtunnels te gebruiken. Op dit moment zijn de windtunnels van Peutz en TNO de enige twee windtunnels die deze goedkeuring hebben verkregen.